



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**NÁVRH A HODNOCENÍ PROCESNÍCH ZAŘÍZENÍ
POŠKOZOVANÝCH DEGRADAČNÍMI MECHANISMY**

DESIGN AND EVALUATION OF PROCESS EQUIPMENT DAMAGED BY DEGRADATION MECHANISMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zuzana Cablková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Lošák, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Studentka: **Zuzana Cablková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Lošák, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh a hodnocení procesních zařízení poškozovaných degradačními mechanismy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Procesní zařízení často pracují s vysokými teplotami a tlaky či agresivními médii a musí být schopny odolat všem působícím degradačním mechanismům minimálně po naprojektovanou dobu životnosti. Práce se zaměří na zmapování vybraných degradačních mechanismů a možnosti jejich hodnocení.

Cíle bakalářské práce:

Seznámení se s degradačními mechanismy procesních zařízení.
Provedení literární rešerše možností hodnocení vybraných degradačních mechanismů.
Posouzení vlivu vybraného degradačního mechanismu na zvolené geometrii.

Seznam doporučené literatury:

VEJVODA, Stanislav. Stavba procesních zařízení: hodnocení odolnosti materiálů tlakových nádob proti jejich poškození v provozních podmínkách. Brno: CERM, 2002. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-2302-2.

Fitness-for-service. API 579-1/ASME FFS-1. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2016.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je cílena na hodnocení vybraných degradačních mechanismů, které se vyskytují u procesních zařízení. Hodnocení má nepochybně význam z hlediska bezpečnosti a predikce zbytkové životnosti. Tato problematika je v práci demonstrována na dvou mechanismech. První z nich se objevuje v prostředích se zvýšenou teplotou, jedná se o jev zvaný tečení materiálu. Teoretická část práce pokrývá základní principy mechanismu tečení a jeho vliv na materiál. Okrajovým ale nezanedbatelným problémem je výskyt tohoto poškození ve svarových spojích. Predikcí a posouzením tečení se zabývá značná část norem. Součástí této práce je zmapování a do určité míry i porovnání několika vybraných postupů. Druhý uvedený degradační mechanismus souvisí s přítomností agresivních sloučenin jako je sulfan neboli sirovodík. Ten může vést k vodíkové křehkosti, puchýřům a mnoha dalším poškozením. Podobně jako u tečení, i pro tyto mechanismy je v práci vytvořen přehled norem, které se věnují návrhu, hodnocení nebo údržbě takto používaných zařízení. Obsahem praktické části této práce je výpočet hodnocení takového zařízení za využití postupů normy API 579-1.

KLÍČOVÁ SLOVA

Degradační mechanismy, creep (tečení), vodíková křehkost, vodíkové puchýře, vodíkem indukované praskání, hodnocení poškození, API 579-1

ABSTRACT

This bachelor thesis is aimed at the evaluation of selected degradation mechanisms which occurs in process equipment. The assessment is undoubtedly important in terms of safety and prediction of residual life. This issue is demonstrated by two mechanisms described in this thesis. A phenomenon called creep is the first of these mechanisms and appears in environments with elevated temperature. The theoretical part of the thesis covers the basic principles of the creep mechanism and its effect on the material. A marginal but not negligible problem is the occurrence of this damage in welded joints. Many standards deal with the prediction and assessment of creep. Part of this thesis is the mapping and to some extent a comparison of several selected procedures. The second degradation mechanism is related to the presence of aggressive compounds such as sulfide. This can lead to hydrogen embrittlement, blisters, and many other damages. As with creep, an overview of standards devoted to the design, evaluation, or maintenance of equipment used in this way is created for these mechanisms. The content of the practical part of this thesis is the calculation of the evaluation of such a device by using the procedures of the API 579-1 standard.

KEY WORDS

Degradation mechanisms, creep, hydrogen embrittlement, hydrogen blisters, hydrogen induced cracking, damage evaluation, API 579-1

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CABLKOVÁ, Z. *Návrh a hodnocení procesních zařízení poškozených degradačními mechanismy*, Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav procesního inženýrství. 54 s. Vedoucí práce Pavel Lošák.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma *Návrh a hodnocení procesních zařízení poškozených degradačními mechanismy* vypracovala samostatně, pod vedením pana Ing. Pavla Lošáka, Ph.D. a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 19. května 2021

.....

Zuzana Cablková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat svému partnerovi, rodině a přátelům za pochopení a podporu při psaní této práce, mému vedoucímu práce panu Ing. Pavlovi Lošákovi, Ph.D. za užitečné rady a připomínky. V neposlední řadě děkuji všem vyučujícím z fakulty, kteří mi pomohli k nabytí vědomostí v dosavadním studiu.

OBSAH

| | |
|--|----|
| Úvod..... | 9 |
| 1. Creep | 10 |
| 1.1. Vysokoteplotní creep..... | 11 |
| 1.2. Tahová zkouška | 12 |
| 1.3. Creep a svarové spoje | 14 |
| 2. Hodnocení creepového poškození | 16 |
| 2.1. Možnosti hodnocení | 16 |
| 2.1.1. ČSN..... | 16 |
| 2.1.2. TRD | 17 |
| 2.1.3. API..... | 17 |
| 2.1.4. BS..... | 19 |
| 2.2. Úvod do hodnocení vybraného zařízení..... | 21 |
| 2.3. Vyhodnocení vybraného zařízení..... | 22 |
| 3. Poškození způsobené vodíkem | 24 |
| 3.1. Vodíkové zkřehnutí..... | 24 |
| 3.1.1. Růst trhlin | 26 |
| 3.2. Vodíkové puchýře v kovech | 28 |
| 3.2.1. Tvorba a vývoj puchýře..... | 28 |
| 4. Hodnocení vodíkového poškození | 30 |
| 4.1. Možnosti hodnocení | 30 |
| 4.1.1. API..... | 30 |
| 4.1.2. ČSN | 31 |
| 4.1.3. NACE..... | 33 |
| 4.2. Úvod do hodnocení vybraného zařízení..... | 36 |
| 4.3. Souhrn údajů | 37 |
| 4.4. Vyhodnocení vybraného zařízení..... | 38 |
| Závěr | 41 |
| Seznam použité literatury | 43 |
| Seznam použitých symbolů a veličin..... | 49 |
| Seznam použitých zkratk..... | 51 |
| Seznam obrázků a grafů | 52 |
| Seznam tabulek..... | 53 |
| Seznam příloh | 54 |

ÚVOD

V rozvoji vědy a techniky se za posledních pár desetiletí dá pozorovat značný pokrok. Do kontaktu s novými technologiemi přichází člověk prakticky denně. Tento pokrok se sebou však, kromě vyšší životní úrovně, přináší také zodpovědnost. Je nutné více dbát na bezpečný a ekologický provoz závodů a neignorovat náznaky technických nedostatků. Následky, které by způsobilo selhání zařízení, mohou být devastující v ohledu na možné vzniklé hmotné škody, životní prostředí a v neposlední řadě na lidské životy. Velkou roli při předcházení vzniku poruch a selhání hraje jejich správný návrh. Ten zahrnuje volbu vhodného materiálu, rozměrů, druhů svarových spojů a mnoho dalších nezanedbatelných detailů. V případě nevhodné volby jednoho či více zmíněných parametrů může docházet k zhoršení některých materiálových vlastností, různým vadám a defektům. Podobné komplikace plynou také z nedodržení technologických postupů při výrobě ve snaze o časovou či ekonomickou úsporu. Tyto chyby lze označit jako degradaci výroby. Za předpokladu že bylo zařízení vhodně zkonstruováno a výrobní degradace je minimalizována, může způsobit nemalé problémy degradace provozní, kterou se tato práce zabývá [1]. Provozní degradace se projevuje ve formě různých degradačních mechanismů například ve formě koroze, tečení materiálu nebo poškození způsobené únavou. K optimální funkci zařízení jednoznačně přispívají pravidelné kontroly, které tyto poškození mohou odhalit včas.

Procesní zařízení, na které je tato práce zaměřena, se také nevyhnou degradaci. Existuje celá řada provozních degradačních mechanismů, které se u procesních zařízení objevují. Jejich výskyt je závislý na provozních podmínkách, jako je zatížení či teplota i prostředí kterému jsou vystavovány. U některých typů provozu, se s výskytem takových poškození v navrhované době životnosti počítá. Proto přítomnost poškození, do jisté míry, ještě nutně neznamená, že je zařízení určeno k likvidaci. Pro tyto účely existují postupy k hodnocení přípustnosti degradace a způsobnosti zařízení pro další provoz. Pozornost v této práci je věnována právě možnostem těchto hodnocení, které existují především ve formě norem, pro zvolené degradační mechanismy.

Prvním krokem ke zvládnutí dané problematiky je seznámit se základními principy vzniku a chování degradačních mechanismů. Kapitoly jedna a tři v této práci jsou proto věnovány vysokoteplotnímu tečení a poškození vznikajícímu za přítomnosti vodíku. Jedním z cílů této práce je aplikovat výše zmíněné hodnocení na zařízení poškozené tímto degradačním mechanismem. Praktická část ve formě příkladu pak demonstruje průběh takového hodnocení.

1. CREEP

Tečení materiálu je obecně definované jako pomalá plastická deformace materiálu způsobená dlouhodobou teplotní expozicí. Dochází k němu, pokud je materiál vystavený konstantnímu zatížení za přítomnosti zvýšených teplot. Pro odborný termín tečení se používá také anglický název creep [2]. K tomuto degradačnímu mechanismu dochází zpravidla po dosažení napětí, a to menšího, než je mez kluzu, která byla stanovena z tahové zkoušky za dané teploty T_s . Teplota T_s , po jejíž překročení nastává tečení, závisí na druhu materiálu. Tato teplota souvisí s teplotou tavení. U kovů a slitin přibližně platí následující vztah [1]:

$$0,3 \cdot T_t \leq T_s \quad (1)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|-------|--|
| T_t | teplota tavení [K] |
| T_s | teplota materiálu po jejíž překročení nastává tečení [K] |

Creep je proces, při kterém narůstá trvalá deformace za působení stálého napětí a stálé teploty. Tento proces tedy lze popsat pomocí závislosti mezi deformací, časem, danou teplotou a napětím [1]:

$$\varepsilon = f(t) \quad (2)$$

$T_s = \text{konstantní}$
 $\sigma = \text{konstantní}$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|---------------|---------------|
| ε | deformace [-] |
| σ | napětí [MPa] |
| t | čas [s] |

S rostoucí teplotou materiálu a hodnotou působícího napětí, roste velikost deformace, rychlost tečení materiálu, naopak doba do lomu klesá. Rychlost tečení tedy lze vyjádřit vztahem [1]:

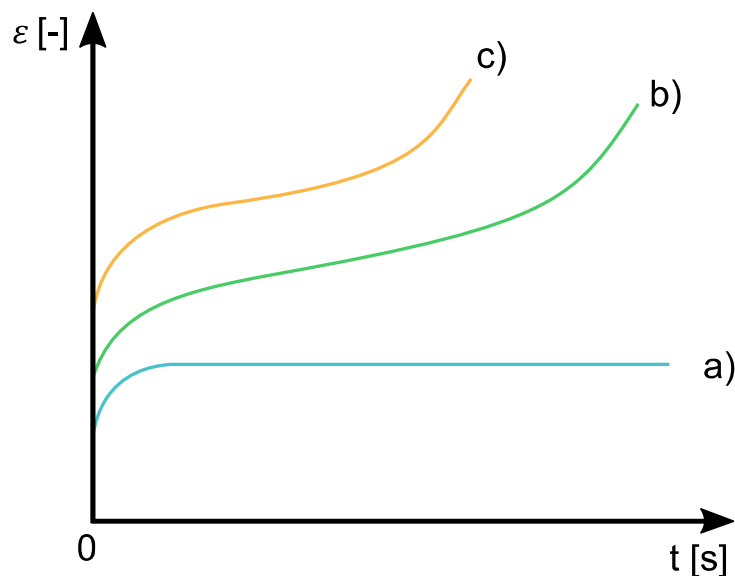
$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|---------------------|--|
| $\dot{\varepsilon}$ | rychlost tečení materiálu [s^{-1}] |
|---------------------|--|

Z obrázku 1.1 je vidět, jak se vlivem teploty a napětí mění jednotlivé průběhy křivek deformace za čas. Dle závislosti na teplotě a napětí lze creep rozdělit na tyto oblasti tečení [3] (obr. 1.1):

- nízkoteplotní, logaritmické – probíhá za teplot $T_s \leq 0,3 T_t$
- vysokoteplotní – probíhá za teploty $T_s \approx 0,4 \cdot T_t$ a vyšší
- difúzní – $T_s > 0,9 T_t$



Obr. 1.1 – Oblasti tečení [3]

Velikost nízkoteplotního tečení na čase je vyjádřena vztahem [1]:

$$\varepsilon = \varepsilon_o + \alpha \cdot \ln(\gamma \cdot t + 1) \quad (4)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|-----------------|---|
| ε_o | počáteční deformace [-] |
| α | materiálový parametr, závislý na teplotě a napětí [-] |
| γ | materiálový parametr, závislý na teplotě a napětí [-] |

1.1. VYSOKOTEPLTNÍ CREEP

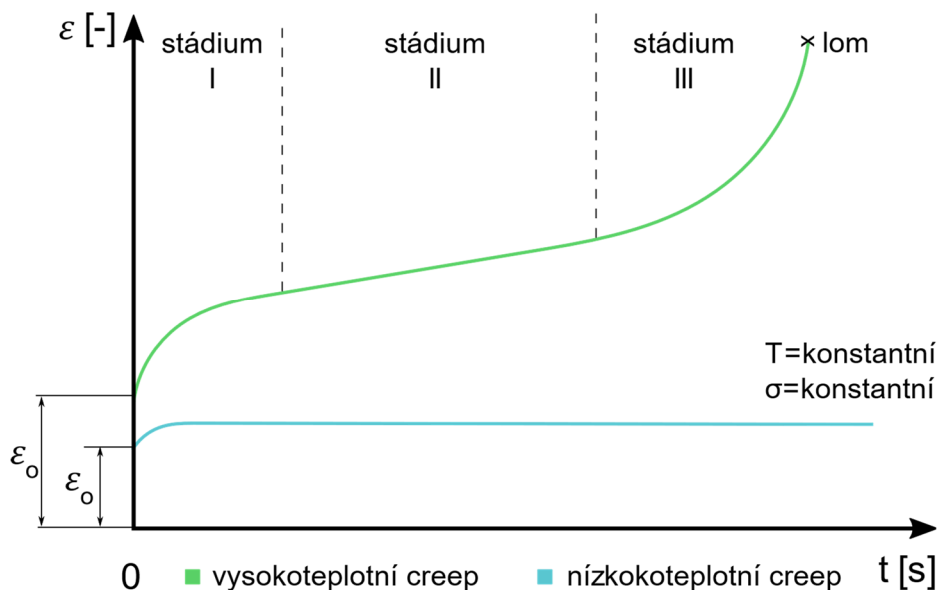
Z praktického hlediska je důležitý zejména vysokoteplotní creep. Zkouška tečení ukazuje jak nezávisle na čase, bezprostředně po zatížení vzorku, nastává pružná deformace, případně okamžitá plastická deformace [1]. Obrázek 1.2 zobrazuje creep jako funkční závislost deformace na čase z makroskopického hlediska. Jsou na něm vyobrazeny úplné křivky tečení, v případě vysokoteplotního creepu včetně jejich stádií.

Před začátkem křivky nízkoteplotního creepu a primárního stádia vysokoteplotní křivky tečení nastane okamžitá neboli prvotní či počáteční deformace. Ta vzniká při zatížení vzorku z nulové hodnoty napětí na danou hodnotu napětí [1]. Toto stádium má zpravidla pružný charakter deformace, velikost počáteční deformace popisuje Hookův zákon:

$$\varepsilon_o = \frac{\sigma}{E_T} \quad (5)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|-------|---|
| E_T | modul pružnosti při teplotě T_S [MPa] |
|-------|---|



Obr. 1.2 – Schéma reprezentující creepové chování [1]

Nízkoteplotní a vysokoteplotní křivka tečení materiálů. Schéma vznikla ze zatížení vzorku při zkoušce tečení popsané níže.

I. stádium – neustálené tečení (primární, přechodové). Po zatížení rychlost deformace klesá. Protože deformační zpevňování je výraznější než odpevňování.

II. stádium – ustálené tečení, (sekundární tečení). Rychlost tečení je nízká, prakticky konstantní a nazývá se stacionární rychlost tečení. Počet dislokací klesne, jejich hustota se sníží. Zároveň se v důsledku vnějšího zatížení zvětší plastická deformace. Při zotavení poklesne tvrdost, materiál zareaguje vznikem nových dislokací, po kterých se materiál zpevní. V reakci na rovnováhu mezi těmito protichůdnými procesy deformačního zpevňování a zotavení má sekundární stádium z hlediska času obvykle nejdelší trvání.

III. stádium – zrychlené tečení (terciální tečení). Rychlost deformace se prudce zvyšuje až do lomu, kterému předchází procesy poškození v důsledku strukturních změn doprovázených tvorbou kavit, dutin, vnitřních trhlin a separace hranic zrn. Tato rychlost je však závislá také na tvaru tělesa. Ku příkladu u zkušební válcové nádoby, na rozdíl od válcové tyče, se projeví vliv víceosé napjatosti. Oktaedrické smykové napětí a rychlost deformace je za stejného napětí menší než u tyče [4].

1.2. TAHOVÁ ZKOUŠKA

Zkouška creepového chování poskytuje informace o vlastnostech materiálů zatížených tímto degradačním procesem. Vzorek se zahřeje na teplotu, která je po dobu zkoušky udržována, poté je zatížen konstantní silou, která vyvolává napětí. Efekt konstantního zatížení lze docílit jednoduchou metodou za použití závaží [5]. Na tomto principu je ku příkladu založena Andradeho creepová zkouška. Závaží, se speciální geometrií o určité hmotnosti, je upnuto k testovacímu vzorku a ponořeno do kapaliny s určitou hustotou. Jak se zkušební vzorek prodlužuje, závaží klesá, jeho větší část je ponořena v kapalině, v důsledku, čeho klesá také působící síla. Specifický tvar závaží zaručuje rovnoměrnou deformaci vzorku a konstantní napětí [6]. U všech testů se pak měří velikost deformace v závislosti na čase (II. stádium) a doba do vzniku lomu (III. stádium). Výsledná deformace je pak podílem přetvoření

a původní délky [1]. Provádět tuto zkoušku má samozřejmě smysl zejména pro žárupevné a žáruvzdorné materiály. Jako je ku příkladu slitina IN-617 [7]. V ní je obsažen hlavně nikl, chrom, kobalt a molybden. Tyto příměsi zajišťují vlastnosti materiálu jako je vysoká teplotní pevnost a stabilita, nebo odolnost vůči oxidaci a nauhličování. Její využití lze nalézt například u výměníků tepla, které mohou pracovat za teplot vyšších než 850 °C [8]. A přesně při teplotě 850 °C a napětí 59 MPa byly, při creepové zkoušce, objeveny u této slitiny první známky rekrytalizace v podobě nahromaděných dislokací a vzniknutých subzrn. Zkouška běžela v tom čase již 1000 hodin. Dislokace a subzrna jsou, jako i další, ku příkladu creepové dutiny vnitřní oxidace, faktory, které vedou k lomu. Takže než k němu dojde, v některých případech, to může trvat i desítky let. Z toho důvodu se často provádějí testy za použití vyššího namáhání, s cílem ušetřit čas a finanční prostředky. Pro dosažení výsledků je pak nutno užít extrapoláční metody creepového života, jako je Wilshireova rovnice. Ta byla vyvinuta v roce 2007. S její pomocí lze normalizovat napětí při různých teplotách [9]:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{TS}}\right) = \exp\left\{-k_1 \left[t_f \exp\left(\frac{-Q_c^*}{RT}\right)\right]^u\right\} \quad (6)$$

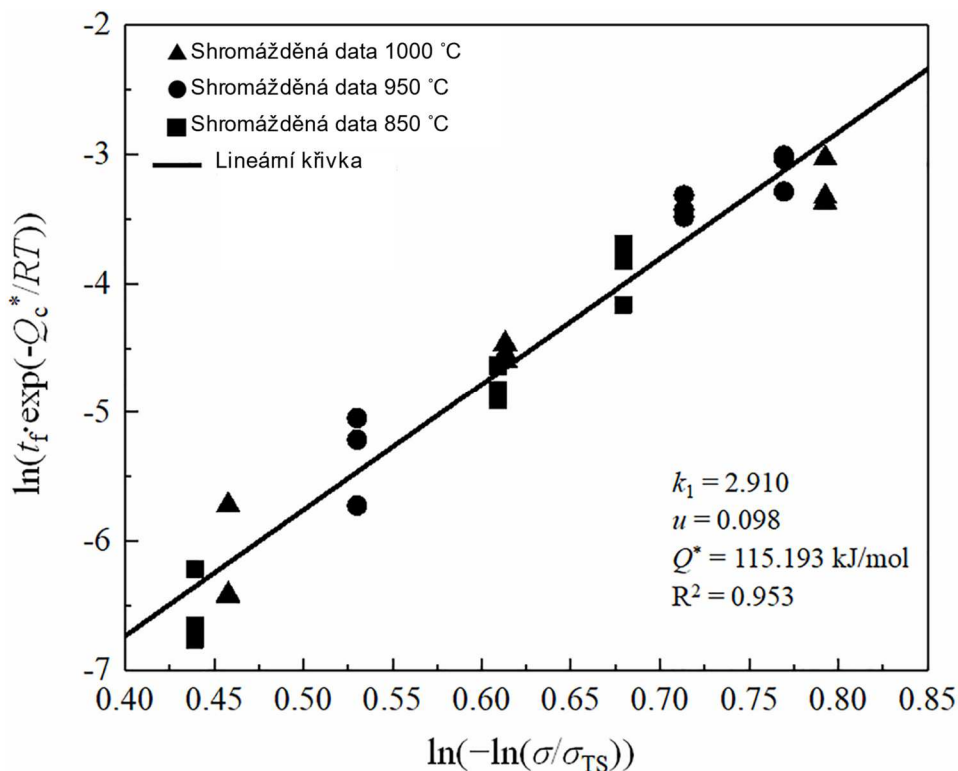
Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|---------------|---|
| σ_{TS} | mez pevnosti v tahu [MPa] |
| Q_c^* | zdánlivá aktivační energie creepu [J·mol ⁻¹] |
| t_f | čas do lomu [s] |
| k_1 | přizpůsobovací konstanta [-] |
| u | přizpůsobovací konstanta [-] |
| R | univerzální plynová konstanta [J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹] |
| T | absolutní teplota [K] |

Pomocí úpravy je možné rovnici (6), dostat do podoby která se nachází na vodorovné a svislé ose grafu (obr. 1.3). Z rovnice v tomto tvaru pak lze stanovit křivku závislosti pro extrapolaci dlouhodobé životnosti, při konkrétní provozní teplotě a napětí. K získání dat pro konstrukci níže vyobrazené křivky, byly prováděny tahové zkoušky při teplotách 850, 950 a 1000 °C a různých napětích v rozmezí 30 až 52,5 MPa na vzorcích o průměru 10 mm a délce 48 mm. Jak by se dalo očekávat s rostoucí teplotou se výrazně zhoršují mechanické vlastnosti materiálu jako mez kluzu a pevnost v tahu, to jasně ukazuje tabulka 1.1 [9].

Tabulka 1.1 – Mez kluzu a mez pevnosti v tahu materiálu IN617 [9]

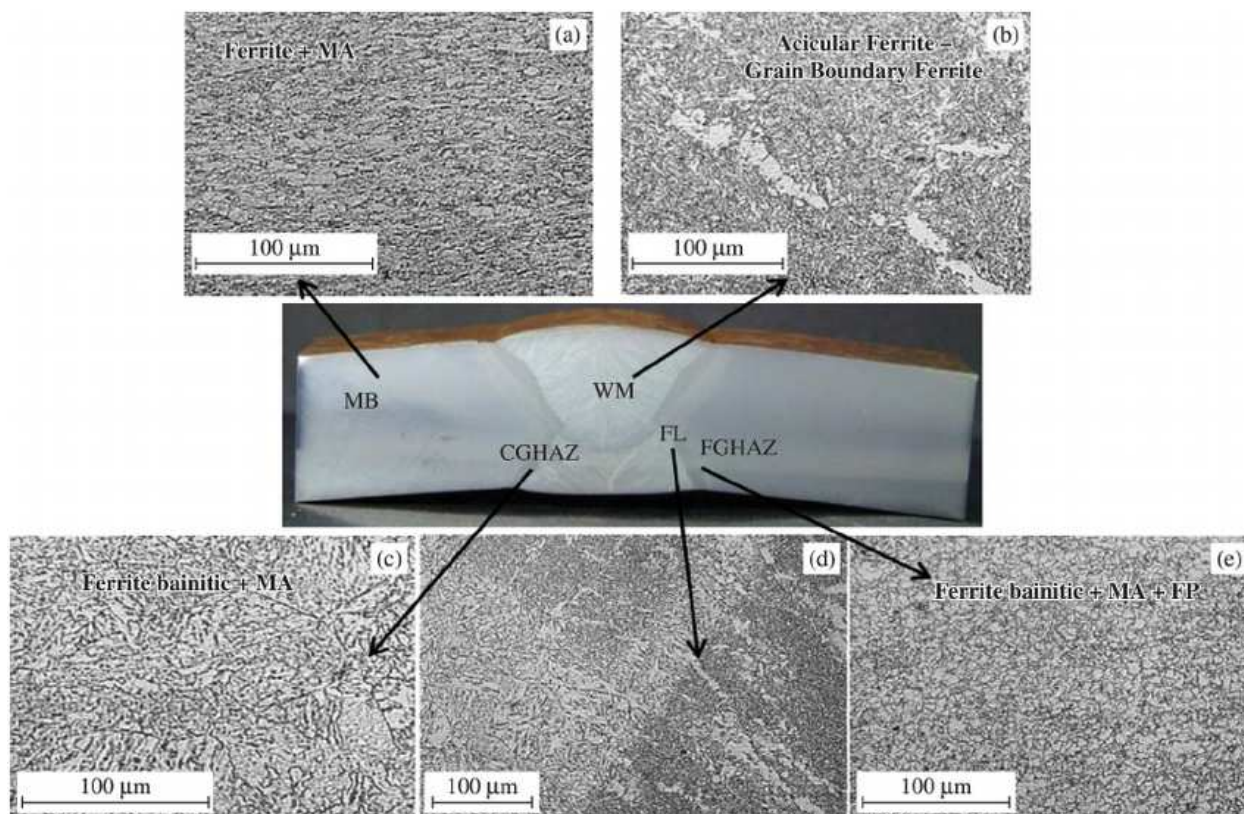
| Teplota [°C] | Mez kluzu [MPa] | Mez pevnosti v tahu [MPa] |
|--------------|-----------------|---------------------------|
| 850 | 253,9 | 377,4 |
| 950 | 182,1 | 207,8 |
| 1000 | 69,1 | 149,5 |



Obr. 1.3 – Graf demonstrující funkci Wilshireovy rovnice [9]

1.3. CREEP A SVAROVÉ SPOJE

Tečení materiálu může postihnout nejen základní materiál, ale také svarový spoj, a to i v případě, že byla použita vhodná konstrukce, zajištěna správná montáž a optimální kombinace základních a přídavných materiálů. Už při vyhotovení svarového spoje může dojít k viditelným trhlinám, ale také k mnoha nežádoucím strukturálním změnám jako je zhrubnutí austenitických zrn, precipitace sekundárních fází či zvýšení hustoty dislokací, vyskytujících se v tepelně ovlivněné zóně. Rozsah těchto výrobních degradací se ale díky systému řízení kvality pohybuje v určitých mezích [10]. U svařenců pak může nastat selhání svarového spoje způsobeno creepovým praskáním několika typů. U ocelí s hlavní příměsí chromu a molybdenu byly objeveny 4 druhy. Označují se římskými číslicemi I až IV a lze je rozlišovat zejména dle polohy jejich výskytu ve svarovém spoji. Praskání typu I a II vzniká ve svarovém kovu, ale šíří se odlišnými směry. Zatím co typ I postupuje dále svarovým kovem, typ II přechází do tepelně ovlivněné zóny (obr. 1.4). Typ praskání III se objevuje v hrubozrnné oblasti tepelně ovlivněné zóny, jeho vzniku lze předejít zjemněním zrn (obr. 1.4). To se ale nedá říct o creepovém praskání typu IV, pro které je charakteristické, že se přednostně objevuje v tepelně ovlivněné zóně jemných zrn (obr. 1.4). Praskání typu IV se nelze úplně vyhnout, je možné jeho výskyt pouze minimalizovat [11]. Viditelným projevem tohoto praskání je trhlina na obrázku 1.5. Toto praskání je tedy pokládáno za vážný problém, který nelze ignorovat. Zejména z toho důvodu, že feritické vysokopevnostní žáruvzdorné chrom–molybdenové ocele, jsou ve snaze snížit emise CO₂, a tak i dopad na životní prostředí, často používané jako základní materiál pro výrobu svařovaných parovodů v elektrárnách [12].



Obr. 1.4 – Mikrostruktura svarového spoje [13]:

a) MB (Base metal) – Základní kov, b) WM (Weld metal) – Svarový kov, c) CGHAZ (Coarse grain heat affected zone) – Tepelně ovlivněná zóna hrubého zrna, d) FL (Fusion line) – Hranice natavení, e) FGHAZ (Fine grain heat affected zone) – Tepelně ovlivněná zóna jemného zrna



Obr. 1.5 – Selhání creepem ve svarovém spoji [14]:

Material: ocel 9Cr–1MoVNb; (Base metal) – Základní kov; (Weld metal) – Svarový kov; HAZ (Heat affected zone) – Tepelně ovlivněná zóna

2. HODNOCENÍ CREEPOVÉHO POŠKOZENÍ

2.1. MOŽNOSTI HODNOCENÍ

V této kapitole jsou uvedeny a popsány normy, které lze použít při hodnocení či návrhu zařízení pracujících v oblasti creepu. Ty se od sebe v různých hlediscích liší rozsahem použití, složitostí, uživatelskou přístupností a dalšími faktory, které je dobré před jejich aplikováním na zařízení při výběru zohlednit.

2.1.1. ČSN

Návrh a výpočty týkající se zařízení, u kterých se předpokládá provoz v oblasti creepových teplot je popsán v normě ČSN EN 13445-3 [15]. Kapitola 19, návrh v oblasti tečení, poskytuje postupy pro stanovení hodnoty dovoleného namáhání a definuje součinitel svarového spoje pro skořepiny, příruby, trubkovnice a další tlakově či mechanicky zatížené součásti [15].

Dle ČSN lze také spočítat poškození tečením materiálu a dobu provozního života. Konkrétně se jedná o normu ČSN EN 12952-4 [16]. Norma pokrývá poškození vodotrubných kotlů a jejich hlavních součástí. Jako u většiny výpočtů s creepovou problematikou i v tomto případě se bere do úvahy historie provozu. Výpočet doby provozního života a poškození materiálu tečením probíhá následovně. Nejdříve se rozdělí rozsah tlaku a teploty, při nichž jsou součásti v provozu, do jednotlivých tříd. V případě že byly data automaticky ukládána pomocí systému zpracování dat, lze rozdělení přeskočit a provést posouzení pro zaznamenané hodnoty bez jejich kategorizace do tříd. Za použití průměrného tlaku a minimální naměřené tloušťky se v nejzatíženějším bodě určí membránové napětí pro jednotlivé třídy. Dle obrázku 2.1 se následně vyhodnotí teoretická doba života, opět pro každou třídu teploty/tlaku [16].

Hodnota teoretické doby života se stanoví v průsečíku přímky napětí a dolní mezní křivky pásma rozptylu meze pevnosti při tečení materiálu ($0,8 \cdot R_m \cdot T_{tc}$) při průměrné teplotě každé teplotní třídy (obr. 2.1). Poté se jednotlivé provozní doby dané třídy teploty/tlaku sečtou. Pro podíl využití každé třídy platí vztah [16]:

$$\Delta D_{ci k} = \frac{T_{op}}{T_{al}} \quad (7)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

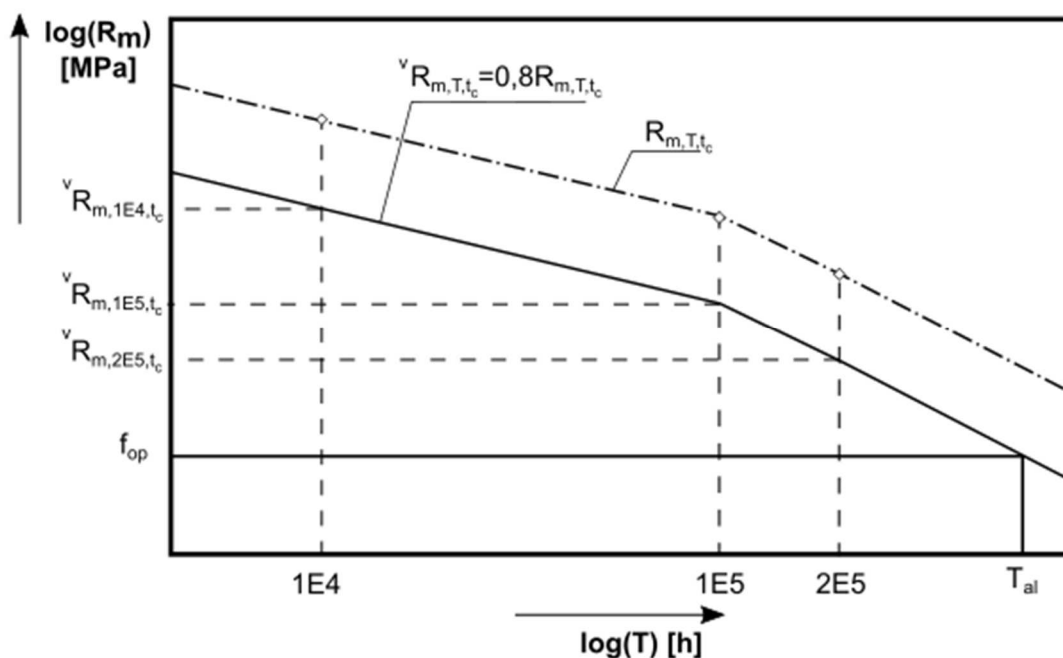
| | |
|------------|--|
| $D_{ci k}$ | podíl poškození materiálu tečením [-] |
| T_{op} | doba provozu při provozních podmínkách [h] |
| T_{al} | teoretická doba života [h] |

Pomocí lineárního pravidla pak lze určit poškození tečením materiálu. To se pro všechny třídy teploty a tlaku v průběhu hodnoceného období stanovuje následovně [16]:

$$D_c = \sum_i \sum_k \Delta D_{ci k} \quad (8)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

D_c poškození materiálu tečením [-]



Obrázek 2.1 – Digram pro stanovení T_{al} [16]

Pokud je potřeba provést tahovou zkoušku tečení, lze se řídit normou ČSN EN ISO 204 [17]. Tato norma detailně popisuje princip zkoušky, požadavky na zkušební zařízení tělesa, celý průběh až po stanovení výsledků a platnosti [17]. Naopak je-li nutné vykonat zkoušku tečením v tlaku, lze postupovat dle normy ČSN EN 993-9 [18].

2.1.2. TRD

Další možností je použití norem TRD 508 [19]. Metoda uvedená v TRD 508 je téměř shodná s tou v ČSN EN 12952-4 [16]. Opět se počítá přípustná doba porušení materiálu tečením založená na době, po kterou membránové napětí dosáhne teoretické životnosti. Postup v normách TRD 508 a EN 12952-4 [16] pro stanovení životnosti creepu je sice zjednodušený, ale bez pochyb účinný [19].

2.1.3. API

Posouzení zařízení pracujících při creepových podmínkách lze nalézt v kapitole deset normy API 579-1 [20]. Určení zbytkové životnosti závisí na napětí a přetvoření v určitém bodě tloušťky stěny součásti, provozní době a teplotě. Hodnocení poškození creepem probíhá systematicky pro každý pracovní cyklus, který se na součást aplikuje, zvláště. Celkové poškození creepem se vypočítá jako součet poškození creepem vypočítaného pro každý cyklus. Tento postup je založen na výpočtu napětí v diskretních časech během historie zatížení. Ve výpočtu napětí lze využít elastickou analýzu nebo pružně plastickou s ohledem na relaxaci [20]. Při použití pružně plastické

analýzy metody konečných prvků, lze využít materiálová data pro modelování chování creepu například z MCP Project Omega [21]. Pak je čas do selhání dán rovnicí [20]:

$$n_L = \frac{1}{\dot{\epsilon}_{co} \Omega_m} \quad (9)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|-----------------------|--|
| n_L | čas do selhání pro n-tý časový přírůstek [h] |
| $\dot{\epsilon}_{co}$ | počáteční rychlost creepové deformace [-] |
| Ω_m | multiaxiální parametr poškození [h ⁻¹] |

Nebo lze použít Larson-Millerův parametr [20]:

$$\log_{10}[n_L] = \frac{1000 \cdot LMP(nS_{eff})}{(460 + nT)} - C_{LMP} \quad (10)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|-----------------|--|
| $LMP(nS_{eff})$ | Larson-Millerův parametr jako funkce napětí nS_{eff} [-] |
| nS_{eff} | efektivní napětí [ksi] |
| C_{LMP} | Larson-Millerova konstanta [-] |
| nT | teplota pro n-tý časový přírůstek [°F] |

Pak je poškození dáno rovnicí [20]:

$$mD_c = \sum_{n=1}^N \frac{n_t}{n_L} \quad (11)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|--------|--|
| mD_c | creepové poškození pro m-tou časovou periodu [-] |
| n_t | přírůstek času nebo doba trvání zatížení pro použití při výpočtu poškození [h] |

A nakonec se vypočítá a zkontroluje celkové poškození pro všechny cykly [20]:

$$D_c^{total} \sum_{m=1}^M mD_c \leq D_c^{allow} \quad (12)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|---------------|--|
| D_c^{total} | celkové creepové poškození s ohledem na všechny provozní cykly [-] |
| D_c^{allow} | dovolené creepové poškození [-] |

Posouzení míry poškození probíhá v celé normě na třech úrovních. První úroveň je nejvíce omezena z hlediska použitelnosti. Aby mohl proběhnout výpočet na úrovni jedna, hodnocené zařízení nesmí být napadeno kromě creepu zároveň například vodíkovými puchýři. Úroveň 1 sestává ze dvou postupů. Ty se liší pouze v tom, jestli

jsou provozní podmínky konstantního nebo proměnlivého charakteru. Oba obsahují šest jednoduchých kroků, ve kterých se určí maximální provozní teplota, napětí a kritická doba z příslušné screeningové křivky. Ta se porovná s dobou, po kterou byla komponenta vystavená teplotě. Pokud tento krok uspěje, hodnocení je úspěšně dokončeno. Pokud ne, určí se míra creepového poškození. Je-li vyhovující, hodnocení na úrovni 1 proběhlo úspěšně a zařízení může být vráceno do provozu. Pokud ne, je nutno provést hodnocení na úrovni 2 nebo 3, popřípadě vyměnit, opravit komponentu či pozměnit její provozní podmínky. Na úroveň 2 jsou před výpočtem kladeny podobné požadavky jako na úroveň 1. Tento posudek je na rozdíl od první úrovně značně složitější. Spočívá v určení zbytkové životnosti podobně, jak je popsána výše. Výpočet je závislý na historii zatížení a výsledcích analýzy napětí. Lze použít Larson-Millerův parametr nebo parametr omega. Pokud hodnocení neuspěje, nabízí se podobné řešení jako po úrovni 1. Úroveň 3 je z hlediska použitelnosti nejbenevolentnější. Je zaměřena na problematiku, které se úroveň 1 a 2 vyhýbá jako například svarové spoje či růst creepových trhlin. Každá podkategorie má svoje samostatné řešení. V případě že zařízení neprojde ani třetí úrovní, nezbyvá než jej opravit, nahradit nebo uzpůsobit provozní podmínky aktuálnímu stavu [20].

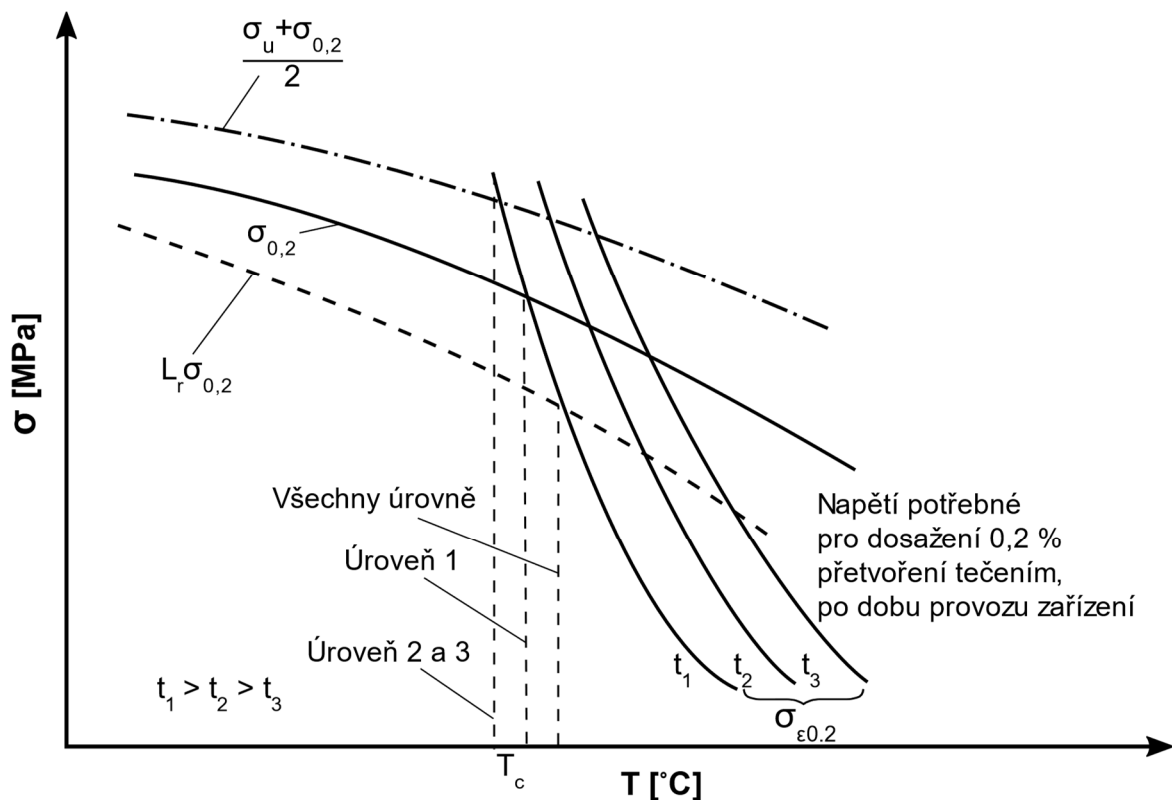
Velkou výhodou této normy je její kompatibilita se softwarem INSPECT [22] od společnosti codeware. Tento program umožňuje provést analýzu na zvolené geometrii. Nejdříve je nutné zadat základní požadovaná data jako je tlak, teplota, provozní doba atd. Poté může uživatel spustit analýzu na zvolené úrovni. V případě hodnocení creepu lze zvolit jen úrovně 1 a 2. Hlavním výstupem je hodnota celkového poškození a skutečnost, jestli zařízení prošlo vybraným hodnocením. Program dále umožňuje studovat detailnější výsledky [23].

2.1.4. BS

Poslední, zde uvedenou, možností hodnocení zařízení pracujících v oblasti teplot creepu je norma BS 7910 [24]. Pro úspěšné použití této normy je nutné mít základní znalosti lomové mechaniky. V normě se dá snadno orientovat, protože podobně jako API 579-1 [20], obsahuje logické diagramy. Pro lepší pochopení norma uvádí ukázkový příklad, jeho výpočet je vysvětlen krok po kroku [24].

Kromě toho, že poskytuje informace pro hodnocení trhlin vznikajících za vysokých teplot, norma také definuje situace, ve kterých lze creep považovat za zanedbatelný. Aby tato skutečnost platila, musí být splněn, alespoň jeden ze dvou následujících případů. Prvním případem je situace, když zařízení bylo za celou dobu provozu, vystaveno maximální teplotě, jejíž hodnota je nižší než hodnota teploty T_c . Teplota T_c je specifická pro různé konstrukční materiály a dobu provozu. Pro materiály s jednoosou tažností při tečení větší než 10 %, lze teplotu T_c určit z obrázku 2.2. Ku příkladu pro uhlíkovou ocel s příměsí manganu je to 330 °C na úrovni hodnocení 1 a 310 °C na úrovni 2 a 3, při provozní době do 200 000 hodin [24].

Pro materiály s jednoosou tažností při tečení menší než 10 %, by měla být teplota T_c určena na základě napětí spojeného s creepovou deformací mající velikost padesátiny skutečné tažnosti při tečení [24].

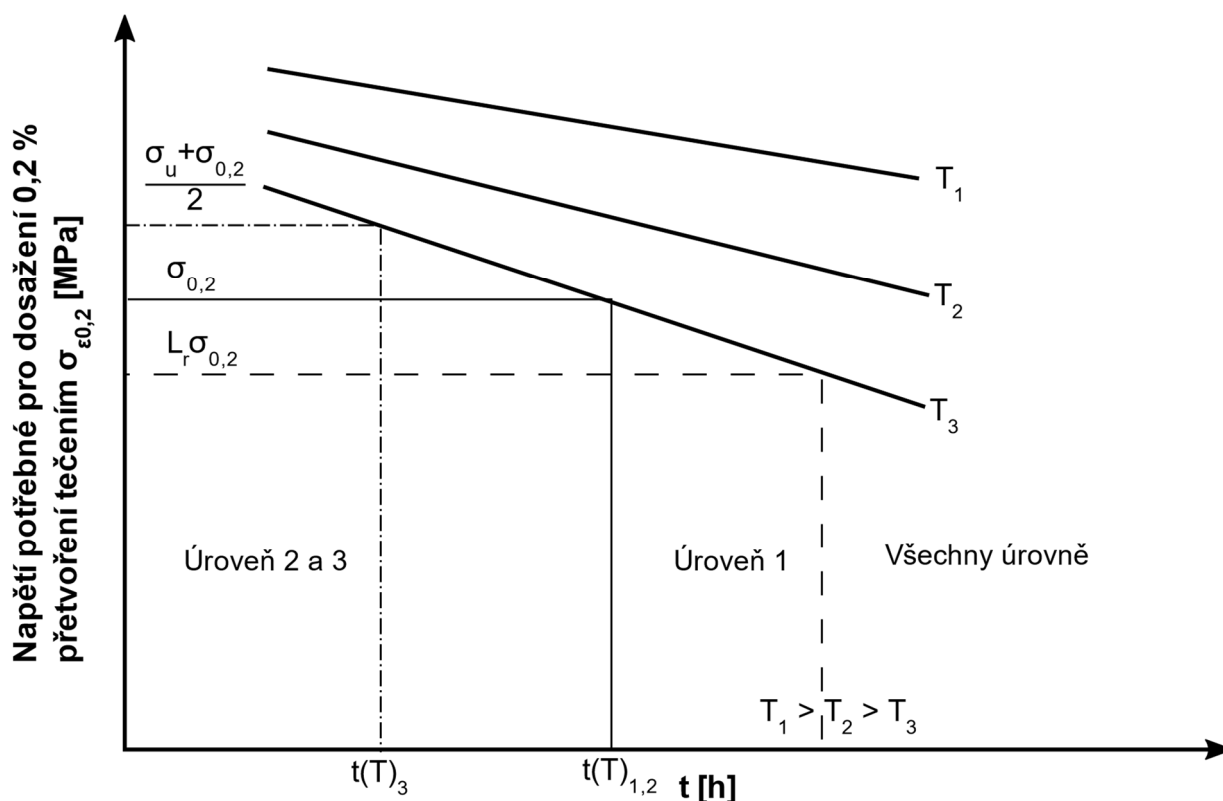


Obr.2.2 – Stanovení teploty T_c [24]
 σ_u – Pevnost v tahu; $\sigma_{0,2}$ – 0,2 % smluvního napětí;
 L_r – Poměr působícího napětí k meznímu zatížení

Druhou možností, při které je možné creep zanedbat je použití „life–fraction“ pravidla. Celková doba provozu nebo teplotní historie zařízení uspěje, pokud platí nerovnost [24]:

$$\int \frac{dt}{t(T)} < 1 \quad (13)$$

Hranicí při určení akceptovatelné doby je pro materiály opět jednoosá tažnost při tečení. Pokud je větší než 10 %, je čas vyžadovaný pro dosažení nahromaděného creepového přetvoření 0,2 %, při napětí odpovídajícímu hodnotě smluvní meze kluzu a konstantní teplotě. Tento čas lze určit za pomoci obrázku 2.3. Pro materiály s jednoosou tažností při tečení menší než 10 %, by měl být čas určen na základě creepového přetvoření o velikosti padesátiny skutečné tažnosti při tečení [24].



Obr.2.3 – Stanovení času $t(T)$ pro dosažení 0,2 % přetvoření [24]
 σ_u – Pevnost v tahu; $\sigma_{0,2}$ – 0,2 % smluvního napětí;
 L_r – Poměr působícího napětí k meznímu zatížení

2.2. ÚVOD DO HODNOCENÍ VYBRANÉHO ZAŘÍZENÍ

Jak už bylo uvedeno výše, creepové praskání typu IV je u svarových spojů velmi častým jevem. Pro účely prozkoumání možností hodnocení tohoto specifického poškození, byl z databáze science direct vybrán konkrétní případ, popsáný ve vědecké publikaci, jedná se o únik páry z parovodu čínské elektrárny [25]. Pro svařované konstrukce, pracující za zvýšených teplot, bývá tento mechanismus často hlavním důvodem selhání. Obvykle se ale rozvine hned zpočátku po uvedení do provozu. V tomto případě však došlo ke vzniku praskliny, dostatečně velké na to, aby způsobila únik páry, už ve třetině odhadované životnosti. Takto neočekávaná porucha je důkazem toho, že praskání se rozvinulo velmi rychle. Odhad stavu, predikce životnosti a kontroly by se tak měly stát prioritními. Zařízení bylo v provozu deset let, při skutečném provozním tlaku 9,7 MPa a teplotě 520 °C, když došlo k poruše. Přičemž hodnoty návrhového tlaku a teploty jsou 10,8 MPa a 545 °C. Obvodový svar byl porušen v dolní polovině v rozmezí 180 ° (3 až 9 hodin). Poškozená komponenta je část parního potrubí vyrobeno ze žáruvzdorné oceli 12Cr1Mo, s vnějším průměrem 480 mm a tloušťkou 42 mm. Tato část, kterou lze vidět na obrázku 2.4, byla po poruše odstraněna a vyříznuta, aby mohla být zkoumána. Při šetření byly použity nedefektoskopické metody, proběhlo pozorování optickým mikroskopem, rastrovacím elektronovým mikroskopem a stereomikroskopem. Bylo zjištěno že dutiny, ze kterých se následně rozvinuly trhliny, vznikly vlivem vakančních pohybů a akumulace. Dle polohy trhlin v tepelně ovlivněné zóně bylo potvrzeno, že se skutečně jedná o creepové praskání typu IV [25].



*Obr. 2.4 – Výřez poškozené části potrubí [25]
(Detail: šíření trhliny podél stěny potrubí)*

Hodnocení poškozených komponent, které jsou v provozu při creepových teplotách, je důležité pro bezpečnou funkci zařízení. Pro potrubí a parovody, zhotovené ze žáruvzdorných ocelí, jsou v současnosti používány hlavně metody metalografie a povrchové tvrdosti. Ultrazvukové či magnetické metody mají dobré odezvy signálu na creepové poškození. Metalurgické hodnocení je třeba provést před dlouhodobým experimentem stárnutí a po něm. Toto hodnocení by mělo zahrnovat typ matrice, velikost zrna, typ a velikost precipitátů, strukturu sub-zrna a dislokační hustotu [25].

2.3. VYHODNOCENÍ VYBRANÉHO ZAŘÍZENÍ

Níže uvedené odstavce pojednávají o možnostech hodnocení creepového praskání typu IV na konkrétní geometrii parovodu, která byla detailněji popsána v kapitole 2.2. Hodnocení je zaměřeno na postupy obsažené v normě API 579-1 [20].

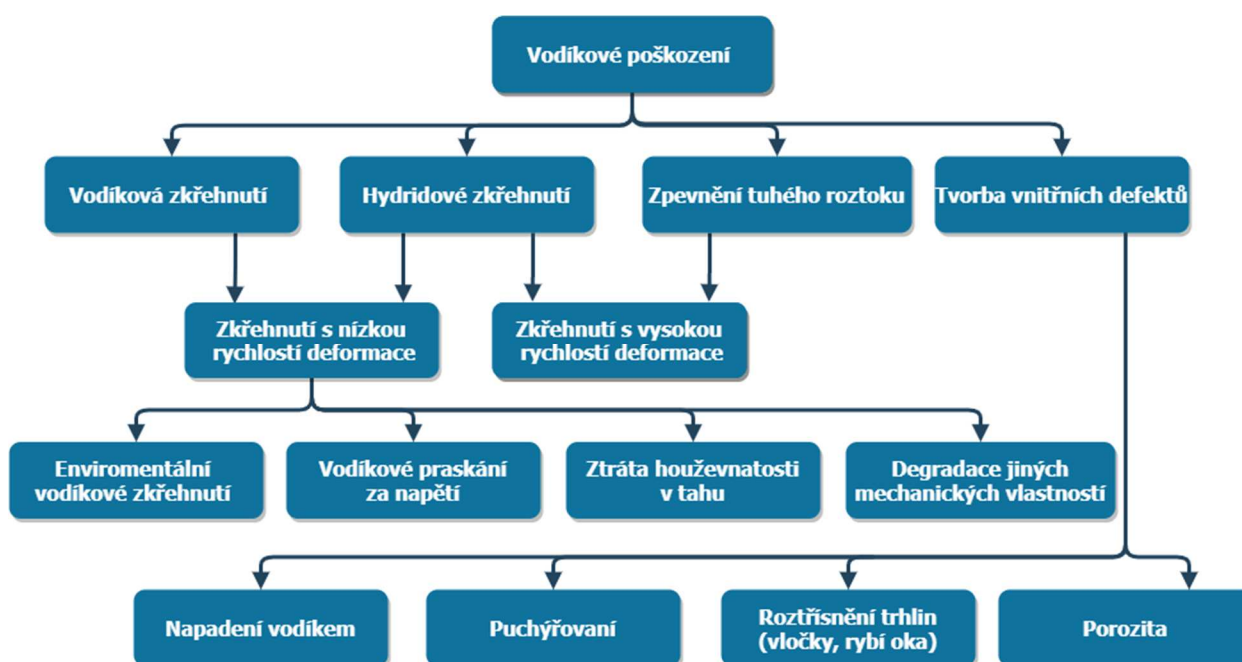
Jak bylo uvedeno výše, norma API 579-1 [20] je při hodnocení míry poškození rozdělena na tři úrovně. Před výpočtem je nutné se ujistit, jestli lze na konkrétní případ výpočet použít. Použití hned první úrovně, v případě creepového praskání, není vhodné. Paragraf 10.2.2.1, odstavec d bod 6, jasně říká, že pro posouzení poškození na této úrovni, součást nesmí obsahovat vadu v podobě trhliny. Ze stejného důvodu není možné aplikovat úroveň 2 (paragraf 10.2.2.2, odstavec d). Toto omezení už neplatí pro úroveň 3, viz paragraf 10.2.2.3. Úroveň 3 je v podstatě určení zbytkové životnosti a zahrnuje 6 postupů řešení. Například pro problematiku únavy svarových spojů je vyčleněn samostatný postup. Je však omezen požadavkem na složení materiálu svaru a také obsahuje podmínku, že svar nesmí být poškozen prasklinami (viz paragraf 10.5.1.2, odstavec e). Pro posouzení samotného praskání ve svaru, tak nakonec vyhovuje jediný použitelný postup (paragraf 10.5.1.2 c). Posouzení zařízení obsahující růst creepových trhlin a zároveň pracujících v oblasti creepu spadá pod paragraf 10.5.4. Tato procedura využívá výše zmíněné parametry Larson-Miller nebo omega. Vyžaduje však přesná data o historii zatěžování, včetně všech operačních cyklů, záznamy o dosavadním poškození a další důležitá data která nejsou dostupná. Výpočet by mohl být proveden v případě doplnění těchto dat. Do budoucna je určité důležité sledovat zařízení v provozu a zaznamenávat hodnoty teploty a tlaku, tyto informace poslouží při výpočtech určení zbývajících životnosti a přijatelnosti dalšího provozu (paragraf 10.7) [20].

Dle paragrafu 10.6.2 je nutné u komponent, které obsahují vadu v podobě trhliny, zjednat nápravu, a to v podobě jejího odstranění. To v tomto případě bylo nevyhnutné, jelikož vada způsobovala netěsnost svarového spoje. Alternativní možností a také prevencí do budoucna je provedení změn provozních parametrů, jako je teplota či zatížení, nebo získáním přesnějších dat o materiálu, které způsobují omezení při hodnocení a plynou právě z nedostatečných údajů [20].

Další možností pro řešení této problematiky je použít výše vzpomínanou normu BS 7910 [24]. Ta má sekci zaměřenou na creepem ovlivněné svarové spoje, která obsahuje výpočet určen právě pro praskání typu IV.

3. POŠKOZENÍ ZPŮSOBENÉ VODÍKEM

Poškození vodíkem se může projevit různými způsoby s odlišnými vlastnostmi a stupněm závažnosti. Do jaké formy se poškození rozvine záleží na mnoha faktorech, jako je zdroj vodíku (plyn nebo kapalina), přítomnost kyselých roztoků, základní materiál, způsob tepelného zpracování, ošetření povrchů, úroveň zbytkových napětí a v neposlední řadě samozřejmě teplota a tlak [26]. Základní rozdělení poškození je uvedeno na obrázku 3.1. Protože forem poškození je skutečně mnoho, detailněji se v této kapitole práce věnuje pouze vodíkovému zkřehnutí a puchýřování.



Obr.3.1 – Základní rozdělení vodíkového poškození [26]

3.1. VODÍKOVÉ ZKŘEHNUTÍ

Základní princip vodíkového zkřehnutí spočívá v difuzi atomů vodíku do mřížky kovu, kde následně vyvolávají dilataci v blízkosti mikrostrukturálních heterogenit [27]. K tomuto procesu dochází například v chemickém průmyslu nebo při svařování nevysušenými elektrodami. V důsledku pomalého ochlazování stěn nádoby vodík vydifunduje ven. Naopak v čele trhlin nádoby nevychází dokonale a vzniká jev zvaný vodíková past. Tento jev nastane, má-li stěna nádoby ochlazovací rychlost $25\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ a vyšší. Nadbytečný vodík se shromažďuje v dutinách. Poklesne-li teplota stěn nádoby pod $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, přejde vodík ze svojí atomární formy do formy molekulární. Molekulární forma má větší objem. V důsledku, čeho se dutiny ve stěnách formy rozpínají a rostou rychleji, hlavně při napětí kolmém na rovinu trhliny, které má hodnotu $0,7 \cdot R_{p0,2}$ a výše. Lomová plocha je postižena podílem interkrystalického lomu, ale k dolomení dochází lomem transkrystalickým, tak jak je to vidět na obrázku 3.2 [4]. Samotné rozpuštění vodíku v oceli může způsobit snížení trvanlivosti a značnou ztrátu houževnatosti. V některých případech lze vodík odstranit následným vyžháním, v takové situaci se jedná o vratnou vodíkovou křehkost. Konstrukce však mají často

velké rozměry, kvůli kterým je není možno do žíhacích pecí dostat, nebo je to technologicky a tím pádem i ekonomicky náročné. V takovém případě je vodíková křehkost nevratná a znamená problém [10]. Dále je třeba vzít v potaz fázové přeměny krystalových mřížek kovu. Atomy vodíku vytvoří před čelem trhliny oblast, která následně omezuje vznik fázových přechodů, v důsledku, čeho vznikají trhliny. Existuje míra vodíku v kovu, po které překročení, nedojde k fázové přeměně vůbec [27]. Samozřejmě má ale každý kov mírně odlišné vlastnosti a strukturální složení. Také proto se projevy vodíkové křehkosti nejčastěji studují experimentálně. Jedná se o techniky měření podmínek potřebných pro vznik předčasných či zbrzděných lomů, a dále o techniky měření parametrů houževnatosti za přítomnosti vodíku. Předčasný lom nastává u tahové zkoušky, při zatížení nižším, než je mez pevnosti v tahu a někdy i mez kluzu zkušebního materiálu. Příčinou jeho vzniku jsou často povrchové nebo vnitřní trhliny, vyvolané právě působením vodíku. Zbrzděný lom nastane, působí-li na vzorek u tahové zkoušky určitou dobu, samozřejmě za působení vodíku, konstantní napětí menší než mez kluzu či pevnost v tahu. Předčasný i zbrzděný lom je posuzován jako lom křehký. Testování na náchylnost k předčasnému lomu probíhá následovně. Upravené, hladké zkušební tyče se elektrolyticky určitou dobu (řádově jsou to desítky hodin) vodíkují, a to v zatíženém či nezatíženém stavu. Po vodíkování se nechá vzorek přibližně tři minuty v klidu, poté následuje vlastní zkouška tahem. Citlivost ke vzniku předčasných lomů je následně vyhodnocena jako pokles pevnosti v tahu a kontrakce relativní k výchozímu stavu vzorku (ještě před vodíkováním) [10]. Tyto techniky jsou podrobněji popsány níže v kapitole 4.

Tento mechanismus značně ovlivňuje teplota. K degradaci materiálu vlivem přítomnosti vodíku, difuzně absorbovaného ve struktuře materiálu, dojde při splnění následujících podmínek [4]:

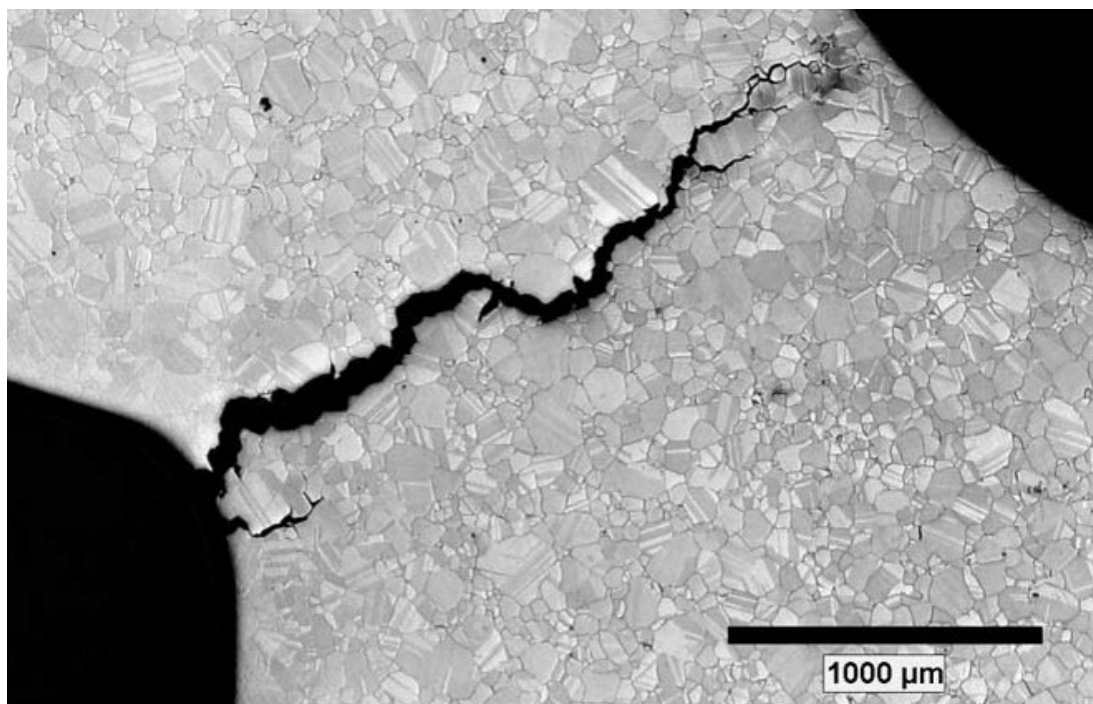
- 1) Materiál tlakové nádoby je ochlazován rychlostí vyšší než 25 °C/hod
- 2) Teplota v dané oblasti materiálu leží v rozmezí od 20 °C až 200 °C
- 3) Napětí kolmé na rovinu trhliny dosahuje hodnotu vyšší než $0,7 \cdot R_{p0,2}$ včetně zbytkových napětí po svařování

Dochází-li k vodíkovému zkřehnutí, lze vypočítat dobu do porušení vzorku vyrobeného ze základního materiálu i tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje, které jsou namáhány konstantním zatížením [4]:

$$t_p = B \cdot \sigma^{b^*} \quad (14)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|-------|-------------------------------------|
| t_p | doba do porušení [s] |
| B | experimentálně určená konstanta [-] |
| b^* | experimentálně určený exponent [-] |



Obr. 3.2 – Příklad trhliny způsobené vodíkovým zkřehnutím [28]
Materiál vzorku ISO 15156 (slitina na bázi niklu, chromu a molybdenu, s vysokou
mezí pevnosti, odolná vůči korozi)

3.1.1. RŮST TRHLIN

Růst trhlín nastává, pokud okamžitá hodnota součinitele intenzity napětí překročí prahovou hodnotu součinitele napětí. Tento proces je schematicky ukázán na obrázku 3.3. Hodnota součinitele napětí je popsána následujícím vztahem [4]:

$$K_{ISH} = \frac{R \cdot T}{A \cdot V^*} \ln \left(\frac{c_{krit}}{c_o} \right) - \frac{R_{p0,2}}{2 \cdot A} \quad (15)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

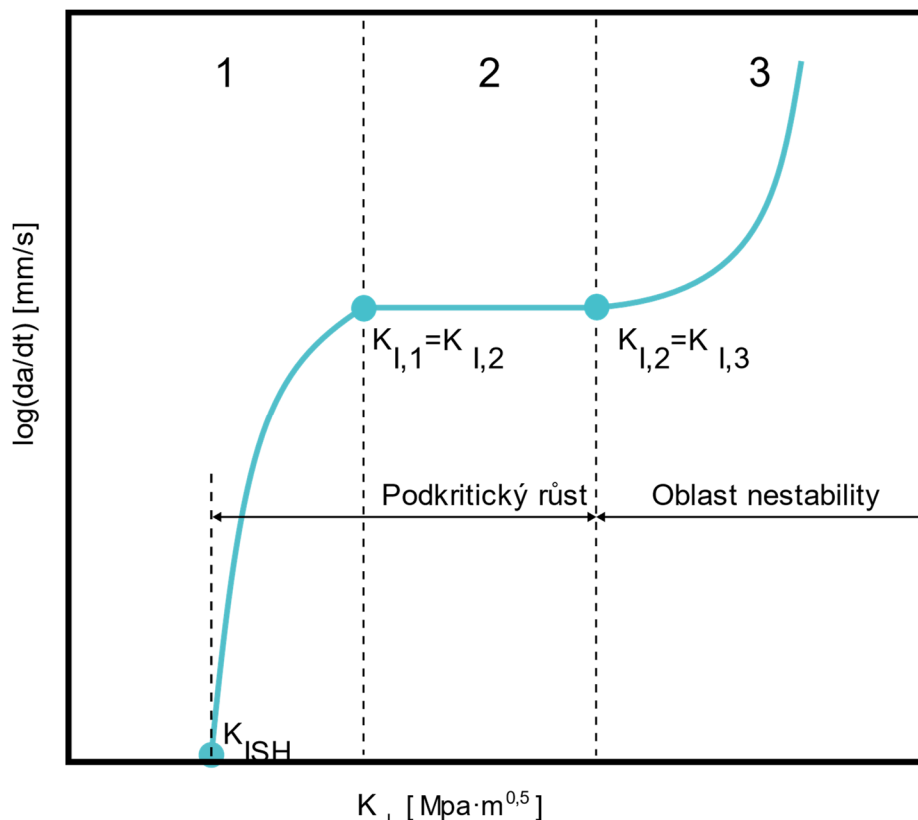
| | |
|------------|--|
| K_{ISH} | prahová hodnota součinitele intenzity napětí [MPa·m ^{0,5}] |
| A | konstanta závislá na materiálu [mm ^{-0,5}] |
| V^* | parciální molekulární objem H ₂ v procesní zóně [m ³ /mol] |
| c_o | obsah difusního vodíku v mřížce [-] |
| c_{krit} | kritický obsah vodíku v procesní zóně [-] |
| $R_{p0,2}$ | smluvní mez kluzu při 0,2 % celkové deformace [MPa] |

Růst korozní trhliny iniciované vodíkem roste s druhou mocninou a pro jeho popis se používá všeobecně uznávaný vztah [4]:

$$\frac{da}{dt} = C \cdot \left[\frac{K_I}{K_{ISH}} - 1 \right]^2 \quad (16)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|-------|---|
| K_I | okamžitá hodnota součinitele intenzity napětí [Mpa·m ^{0,5}] |
| C | konstanta $C \approx 10^{-5}$ [mm·s ⁻¹] |



Obr.3.3 – Růst trhliny s nadifundovaným vodíkem [4]

Rychlost růstu trhlín v jednotlivých stádiích dle obrázku 3.3, je specifická pro každou fázi. Ve stavu rovinné deformace lze tyto rychlosti popsat následujícími vztahy [4]:

a) rychlost růstu pro 1.fázi

$$\frac{da}{dt} = \frac{2(1-\mu)}{3} \frac{1}{d^{1,5}} \left[D_o \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \right] \frac{V^*}{R \cdot T} \frac{c_o}{c_{krit} - c_o} (K_I - K_{ISH}) \quad (17)$$

b) rychlost růstu pro 2.fázi

$$\frac{da}{dt} = \frac{4,5}{d} \left[D_o \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \right] \frac{V^*}{R \cdot T} R_{p0,2} \frac{c_o}{c_{krit} - c_o} \quad (18)$$

c) rychlost růstu pro 3.fázi

$$\frac{da}{dt} = \frac{4,5}{E \cdot d^2 \cdot R \cdot T} \left[D_o \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \right] \frac{c_o}{c_{krit} - c_o} (K_I - K_{ISH})^2 \quad (19)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|-------|---|
| D | lineární průměr primárního austenitického zrna [m] |
| D_o | difúzní koeficient vodíku [mm ² ·s ⁻¹] |
| Q | aktivační energie pro difúzi vodíku v α-mřížce [J·mol ⁻¹] |
| μ | poissonovo číslo [-] |

K_I a K_{ISH} jsou faktory které pomáhají nejen sledovat časovou závislost a definovat podmínky rozvoje trhlin v různých stádiích procesu vodíkového zkrěhnutí, ale také konstruktérovi pomáhají při výběru vhodného materiálu. Nejcitlivější strukturní složkou je z hlediska vodíkové křehkosti martenzit. Citlivost oceli lze snížit popouštěním, které způsobí zjemnění zrn, zjemnění a zrovnoměnění distribuce vyprecipitovaných fází a modifikací vměstků. Naopak nežádoucí zvýšenou citlivost ocelí k vodíkové křehkosti výrazně ovlivňuje interkrystalická segregace škodlivých příměsí. Tyto poznatky vyplývají z dosud provedených prací a experimentů [10].

3.2. VODÍKOVÉ PUCHÝŘE V KOVECH

Vodíkové puchýře (obr. 3.4), jsou projevem trhlin indukovaných vodíkem (hydrogen induced cracking) v literatuře často označené zkratkou HIC. Tento mechanismus se vyznačuje stupňovitým praskáním uvnitř kovu a puchýřováním na jeho povrchu [29]. HIC se pojí s vodíkovým křehnutím, které bylo detailněji popsáno výše [30]. Dutiny a puchýře v kovech a slitinách (v pevném stavu) jsou samozřejmě nežádoucí. I při běžných podmínkách mohou výrazně změnit jejich mechanické vlastnosti a často vedou k selhání materiálu [31].

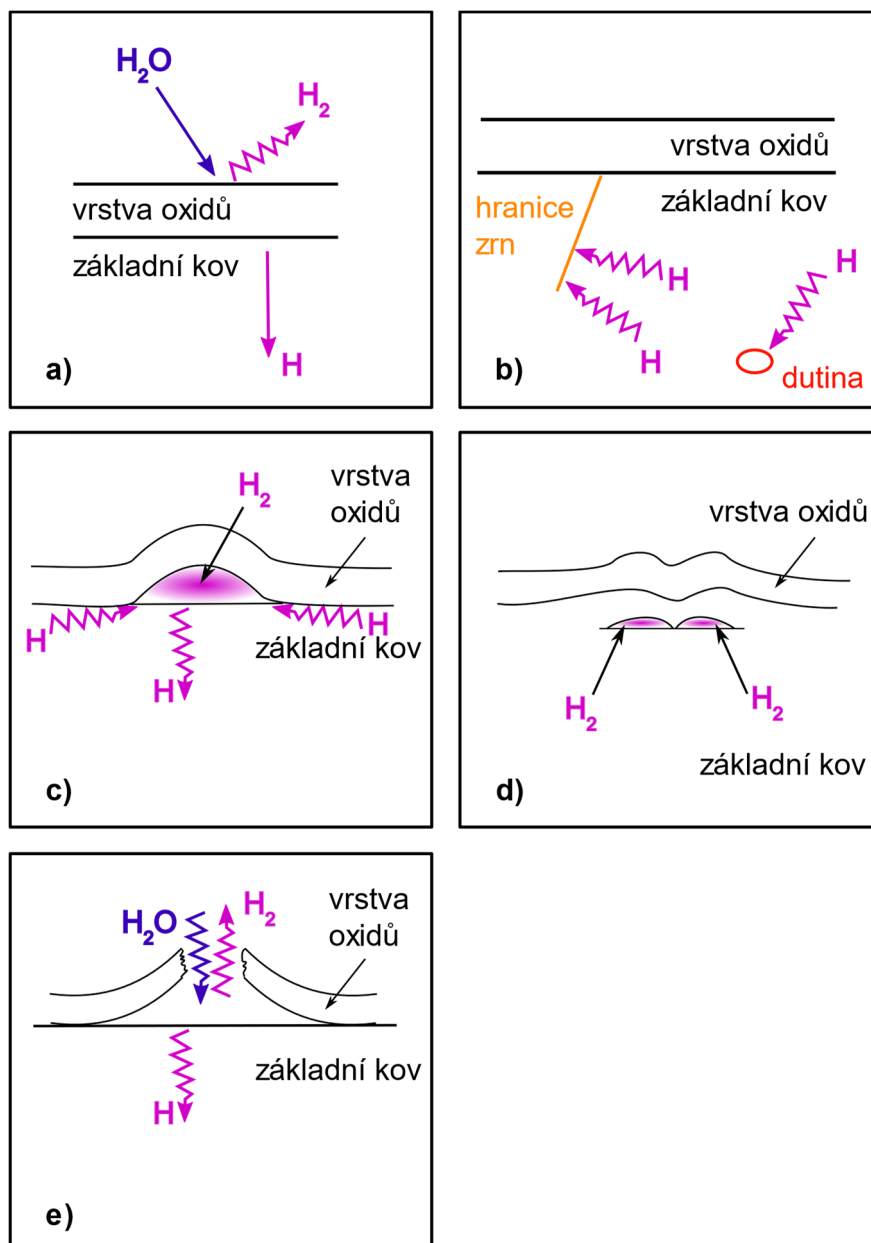


Obr. 3.4 – Vodíkový puchýř v řezu [32]

3.2.1. TVORBA A VÝVOJ PUCHÝŘE

Vznik a tvorba vodíkových puchýřů se může kvůli různým chemickým vlastnostem kovů a médií se kterými reagují lišit. Níže popsaný mechanismus plastické deformace platí pro situaci, kdy je základním kovem hliník a vodík, který s hliníkem dochází do kontaktu, je obsažen ve vodě. Pro vznik tohoto mechanismu je nutnou podmínkou katodická reakce mezi vodou a povrchem hliníku s pasivní vrstvou oxidu. Tato reakce je zdrojem atomárního vodíku (obr. 3.5 a). Vzniknutý atomární vodík difunduje přes vrstvu oxidu do kovu a následně se tvoří jeho precipitáty na vhodných nízkoenergetických místech, jakými jsou hranice zrn nebo dutiny (obr. 3.5 b). Vodík naakumulovaný v podpovrchové oblasti způsobuje plastickou deformaci a vznik puchýře (obr. 3.5 c). Potom mohou nastat dvě situace. O výsledku rozhoduje geometrie puchýře, která se s jeho růstem mění a dvě rychlosti. Relativní rychlost

difuze vodíku z dutiny a rychlost akumulace vodíku do dutiny. Rychlost dodávání vodíku závisí na pasivitě a propustnosti oxidového filmu. Puchýř se zhroutí, pokud dochází k akumulaci vodíku pomaleji než k difuzi vodíku z puchýře (obr. 3.5 d). V opačném případě tlak v puchýři stále roste až nakonec dojde k jeho prasknutí (obr. 3.5 e) [31].



Obr.3.5 – Stádia vzniku vodíkového puchýře [31]

Kromě vzpomínaného mechanismu plastické deformace může vodíkový puchýř vzniknout ještě dalšími dvěma způsoby. Jedním z nich je děrovací mechanismus dislokačních smyček. Většina kovů nemá ve svojí struktuře volný expanzní prostor, takže vznik puchýřů je v tomto případě závislý na vysoké prchavosti plynu uvnitř kovu. Přesun a vytvoření dislokační smyčky tak zajišťuje vysoký tlak. Poslední mechanismus spočívá v shromažďování vakancí, s cílem tvořit jejich shluky a nakonec dutiny. Aby k tomuto mechanismu došlo je nutné přesycení vakancí. Toto přesycení se může objevit například po kalení či zpracování za studena [31].

4. HODNOCENÍ VODÍKOVÉHO POŠKOZENÍ

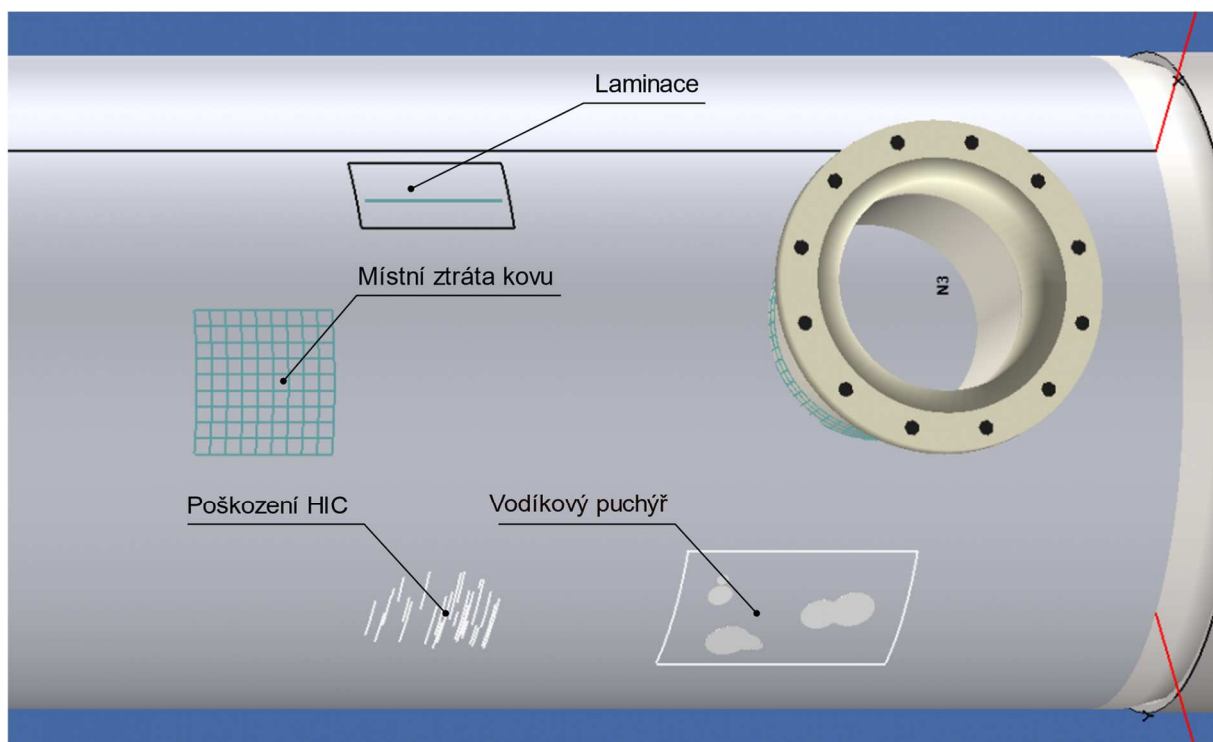
4.1. MOŽNOSTI HODNOCENÍ

Tato kapitola je věnována možnostem hodnocení různých poškození vznikajících vlivem přítomnosti vodíku. Také však obsahuje popis řady norem, které mohou být užitečné při návrhu a konstrukci zařízení, u kterých se s touto problematikou počítá.

4.1.1. API

Norma API 579-1 [20], zmiňovaná už v kapitole 2, je určena také pro stanovení životnosti a posouzení zařízení poškozených vodíkem. Konkrétně řeší problematiku poškození HIC, napětově orientovaných trhlin indukovaných vodíkem, označovaných také zkratkou SOHIC a vodíkovými puchýři. Při hodnocení poškození se opět objevují tři úrovně hodnocení. První dvě nejsou určeny pro SOHIC, pro toto poškození a také pro zařízení, které neprojdou prvními dvěma úrovněmi, je vyčleněna třetí úroveň. Na třetí úroveň se dostane i zařízení které obsahuje velké množství vodíkových puchýřů blízko u sebe nebo v těsné blízkosti svaru či hlavní strukturální diskontinuity. První úroveň obsahuje dva výpočetní paragrafy, jeden pro posouzení trhlin indukovaných vodíkem a jeden pro vodíkové puchýře. Oba jsou zaměřeny na kontrolu rozměrů poškození, minimální tloušťky vzdálenost od svaru, strukturální diskontinuity a podobně. Pokud zařízení vyhoví požadavkům první úrovně, může být navráceno do provozu. V opačném případě je možné zařízení odstavit z provozu, nahradit nebo opravit ve formě odstranění poškozené vrstvy, za předpokladu že lze dodržet předepsané podmínky zbrusování a poté vyhodnotit oslabenou část jako místní tenkou oblast. Samozřejmě se ještě nabízí možnost přejít na další úroveň hodnocení. Výpočetní paragrafy pro druhou úroveň jsou opět dva se stejným zaměřením jako na úrovni jedna. Tyto postupy jsou, v porovnání s první úrovní delší a komplikovanější, obsahují například výpočet maximálního povoleného tlaku. Při nesplnění této úrovně je doporučen stejný postup jako při selhání první úrovně, s výjimkou možnosti broušení poškozené části. Třetí úroveň se skládá ze tří paragrafů, dva pro zařízení, které z výše uvedených nebo jiných důvodů neprošlo předešlými úrovněmi, zbylý paragraf je určen pro hodnocení napětově orientovaných trhlin indukovaných vodíkem. Tyto paragrafy nemají výpočetní charakter, obsahují spíše doporučené postupy jiného druhu posudku nebo řešení vzniknutého problému pro každé uvedené poškození [20].

Jak bylo zmíněno v kapitole věnované creepovému poškození, existuje program, který do určité míry dokáže provést hodnocení dle této normy. Při výpočtu lze na zvolené geometrii simulovat poškození HIC, vodíkové puchýře nebo jejich kombinaci a aplikovat hodnocení na úrovni 1 nebo 2. Jak už bylo uvedeno výše, SOHIC je možné hodnotit až na úrovni 3, kterou software nepodporuje. Při zadávání informací se zobrazují schematické obrázky, které slouží jako legenda pro lepší orientaci ve znacích a indexaci. Po vyplnění údajů a spuštění analýzy uživatel obdrží detailní hlášení o všech poškozených oblastech. Další výhodou tohoto softwaru je možnost přidávat různá poškození na stejný model, tak jak je to znázorněno na obrázku 4.1. To je praktické z hlediska vedení historie záznamů o poškozeních i kombinovaných výpočtů [33].



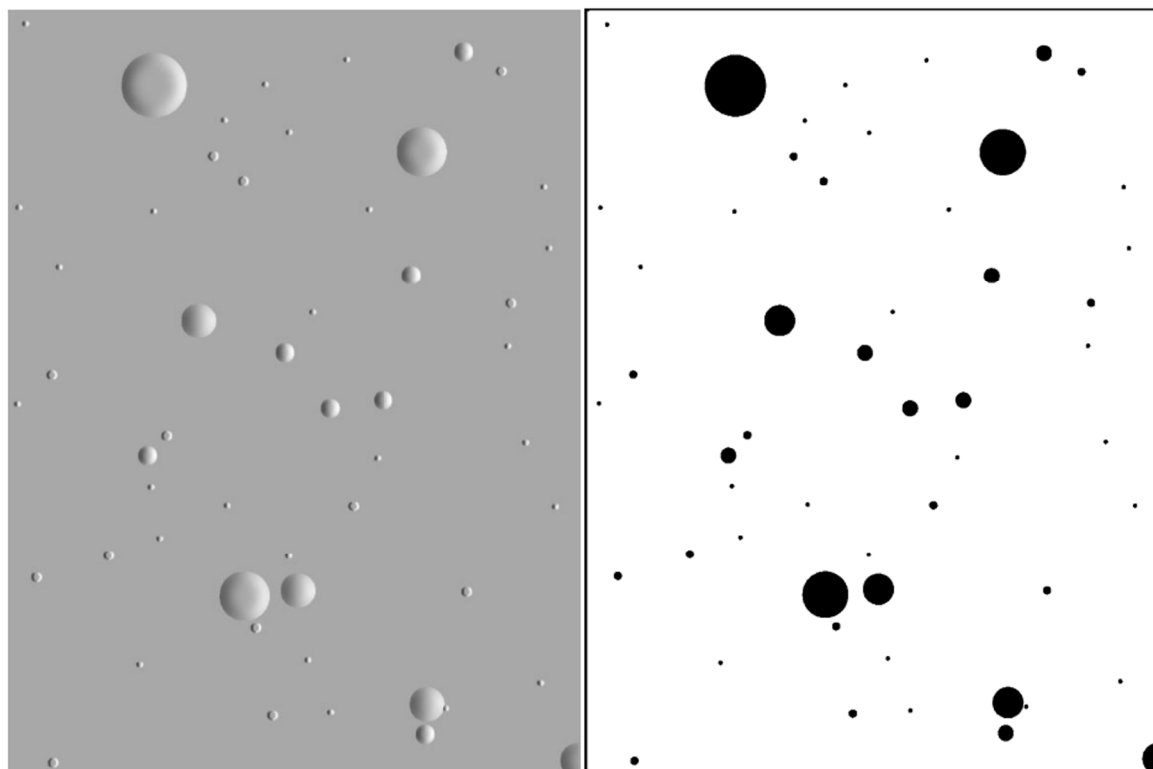
Obr.4.1 – Kombinované poškození na modelu v prostředí programu INSPECT [33]

Při identifikaci a správě zařízení potenciálně vystavených působení vodíku v kombinaci s vysokou teplotou, doslovně napadení vodíkem při vysoké teplotě (high temperature hydrogen attack) neboli HTHA, může být nápomocná norma API RP 941 [34]. Je určena pro zařízení z uhlíkové a nízkolegované oceli, které jsou vystaveny přítomnosti vodíku, provozu za zvýšených tlaků a teplotách vyšších než 204 ° C. Norma zavádí provozní limity pro takto fungující zařízení v ropných rafinériích či petrochemických závodech. Dále se zabývá souvislostí mezi odolností ocele vůči poškození vodíkem ovlivněná vysokým namáháním, tepelným zpracováním nebo chemickým složením. Taktéž obsahuje souhrn inspekčních metod na hodnocení zařízení za přítomnosti HTHA. Naopak nepokrývá problematiku jiných mechanismů vodíkového poškození [34].

4.1.2. ČSN

Normy z řady ČSN neobsahují postupy hodnocení poškození vodíkovým zkřehnutím, HIC, nebo SOHIC, v tak propracované formě jako API 579-1. I když existuje norma ČSN EN ISO 4628-2 [35], která je určena k hodnocení stupně puchýřkování. Přesná definice puchýřkování dle ČSN zní: „*Puchýřování je proces, jehož výsledkem jsou viditelné vypouklé vady na povrchu předmětu, vzniklé místní ztrátou soudržnosti pod povrchem* [36].“ S dodatkem: „*K puchýřování může dojít například na kovu s povlakem v důsledku ztráty přilnavosti mezi povlakem a podkladem způsobené nahromaděním produktů místní koroze. Na kovu bez povlaku může puchýřování vzniknout v důsledku nadměrného tlaku uvnitř obsaženého vodíku* [36].“ Za předpokladu že puchýře vznikly v důsledku absorpce vodíku, je nutné vzít v potaz že se jedná pouze o hodnocení degradace nátěrů, a nikoliv o poškození základního kovu. V normě je vyhodnocováno klasifikační číslo charakterizující puchýřkování nátěru pomocí množství neboli hustoty a velikosti puchýřků. Klasifikační číslo se přiřazuje k poškození prostřednictvím

porovnávání reality s obrazovými standardy obsaženými v normě. Puchýřky pozorované prostým okem se porovnají s klasickými obrazy (obr.4.2 a). Pokud ovšem hodnocení proběhne pomocí optického zobrazovacího systému, využije se kalibračních obrazů (obr.4.2 b). Výsledkem je stupeň puchýřkování, označovaný ve tvaru uvedeném na obrázku 4.2 [35].



a) Množství (hustota) 2 - 2(S5)

b) Množství a (hustota) 2 - 2(S5)

Obr.4.2 – Nátěr obsahující puchýřky o množství 2 a velikosti 5 [35]

a) Klasický obraz; b) Kalibrační obraz

Problematicke vodíkové křehkosti ocelí se věnuje norma ČSN EN 2832 [37]. Přesněji popisuje zkoušku tahem na zkušební tělese s vrubem. Zkouška může být provedena prakticky na jakýchkoliv zkušebních zařízeních, které jsou schopné zatěžovat zkušební vzorky konstantně. Dále norma uvádí požadavky na rozměry a povrchovou úpravu zkušebních těles, ty mají přibližný tvar zkušební tyče při klasické zkoušce tahem. Vzorky vyhotovené dle normy se poté při pokojové teplotě zatíží napětím o hodnotě 75 % pevnosti v tahu daného vzorku bez povrchové úpravy. Zatížení musí být aplikováno minimálně po dobu 200 hodin. Tato doba je zároveň hodnoticí hranicí, do 200 hodin není přípustný žádný lom [37].

Obdobně je popsána zkouška vodíkové křehkosti pomalým ohybem v normě ČSN EN 2831 [38]. Zkušební zařízení se skládá z pohyblivé a pevné upínací čelisti. Dále zařízení obsahuje přístroj na měření úhlů a zvětšující optický přístroj k zjišťování výskytu prvních trhlin. Při zkoušce se používají tři zkušební tělesa, mohou mít geometrii tyče nebo plechu vyříznutého z polotovaru. Vzorky se vyžihají, aby došlo k odstranění vnitřního pnutí a obrobí se na danou drsnost povrchu. Jeden vzorek se ponechá bez povrchové úpravy, je upnut do stroje, kde se určitou rychlostí ohýbá do vzniku první trhliny. Při vzniku první trhliny se запиše příslušný úhel ohybu. Na druhém vzorku

se provede chemická nebo elektrochemická úprava, poté je ohnut stejným postupem jako první vzorek. Třetí vzorek se upraví vyžeháním pro odstranění vodíku a opět je proveden ohyb. Cílem zkoušky je porovnání a ověření původní houževnatosti. Výsledkem zkoušky je houževnatost po provedení povrchové úpravy, uvedená v procentech, určená poměrem [38]:

$$\frac{\alpha_{11}}{\alpha_o} \cdot 100 \quad (20)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|---------------|-------------------------------------|
| α_o | úhel ohybu před úpravou povrchu [°] |
| α_{11} | úhel ohybu po úpravě povrchu [°] |

A také konečná houževnatost získaná z poměru [38]:

$$\frac{\alpha_{12}}{\alpha_o} \cdot 100 \quad (21)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|---------------|-------------------------------------|
| α_{12} | úhel ohybu po odstranění vodíku [°] |
|---------------|-------------------------------------|

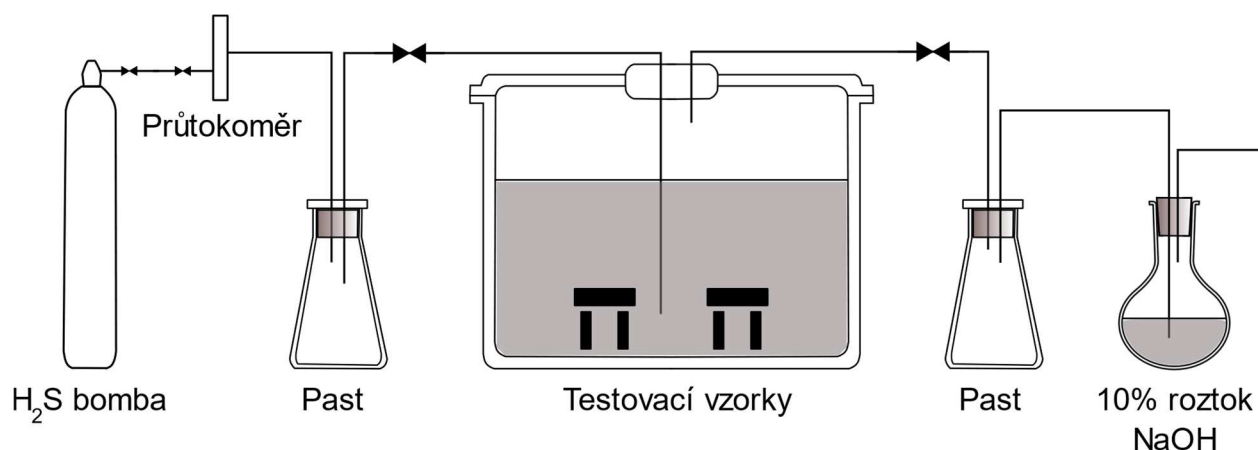
Materiály pro využití v prostředí, obsahujícím H_2S z těžby ropy a zemního plynu se zaobírá norma ČSN EN ISO 15156-1 [39]. Tato norma poskytuje základy pro výběr materiálů odolných vůči sulfanem indukovanému praskání za napětí (sulfide stress-cracking) neboli SSC a koroznímu praskání za napětí (stress-corrosion cracking) tedy SCC. Dále definuje požadavky na laboratorní zkoušky pro kvalifikaci materiálu, provoz s ohledem na možnost vzniku SSC, SCC, HIC, SOHIC, praskání měkké zóny a galvanicky indukovaného vodíkového praskání za napětí nebo jejich kombinací. V případě zavádění nových provozních podmínek, norma poskytuje základní informace pro přehodnocení vhodnosti stávajících slitin užitých v konstrukci zařízení [39]. Další část ČSN EN ISO 15156-2 [40] se podrobněji věnuje litinám, uhlíkovým a nízkolegovaným ocelím, odolným vůči výše uvedeným mechanismům a obdobně ČSN EN ISO 15156-3 [41] pokrývá korozivzdorné a ostatní slitiny odolné vůči tvorbě trhlin.

4.1.3. NACE

Pro účely detekce, zmírnění účinků poškození HIC či SOHIC a následné opravy lze aplikovat postupy normy NACE SP0296 [42]. Její cílovou skupinou jsou hlavně krakovací zařízení vyrobená z uhlíkové oceli, které pracují v kyselém prostředí bohatém na sirovodík. Konkrétně jsou to například potrubí a tlakové nádoby, věže, výměníky tepla atd [42]. Metodám a kontrolám určeným k prevenci vzniku environmentálních trhlin ve svařencích z uhlíkové ocele v provozu se věnuje norma NACE SP0472 [43]. Přesněji se jedná o prevenci vodíkového praskání za napětí neboli HSC a alkalicky korozní praskání za napětí [43].

Pro hodnocení ocelí potrubí a tlakových nádob z hlediska odolnosti proti praskání vyvolanému vodíkem je určena NACE TM0284 [44]. Cílem normy je poskytnout reprodukovatelné testovací prostředí, které je schopné rozlišit citlivost různých vzorků

ocele ke vzniku HIC v poměrně krátkém časovém období. Na rozdíl od výše vzpomenutých zkoušek, popsanych v ČSN EN 2831 [38] a ČSN EN 2832 [37], které se věnují vodíkové křehkosti, tato zkouška neprobíhá při zatížení. Nenamáhaný vzorek je vystaven účinkům jednoho ze standardně používaných roztoků. Jedním z nich je roztok chloridu sodného a kyseliny octové nasycený sirovodíkem při okolním tlaku a teplotě. Také lze použít syntetický roztok mořské vody nasycený sirovodíkem při stejných podmínkách jako u prvního roztoku. Zkušební vzorky jsou po určitý čas ponořeny v roztoku, tak jak je to demonstrováno na obrázku 4.3, poté se odstraní a vyhodnotí. Testování může být provedeno v libovonné vzduchotěsné nádobě, s dostatečným prostorem pro vzorek i pro dodávání a uvolňování sirovodíku [44].



Obr.4.3 – Schéma testovací sestavy [44]

Při demonstraci testování ocelí tlakových nádob, jsou zkušebními vzorky ocelové pláty různých velikostí. V případě potrubí to mohou být bezešvé, spirálové svařené trubky anebo trubky se svarem vyhotoveným elektrickým odporem o různých tloušťkách a průměrech. Vzorky se upraví a ošetří dle pokynů normy. Po skončení testu se tělesa rozřežou a zkoumají se jejich povrchy, které se metalograficky upraví. V ošetřených úsecích se pak měří parametry trhlin, které budou použity ve výpočtu, tak jak je to uvedeno na obrázku 4.4. Pro každou část se pak spočtou následující poměry, vyjádřeny v procentech [44]:

- 1) Poměr citlivosti trhlin (CSR)

$$CSR = \frac{\sum(a \cdot b)}{W \cdot H} \cdot 100 \quad (22)$$

- 2) Poměr délky trhlin (CLR)

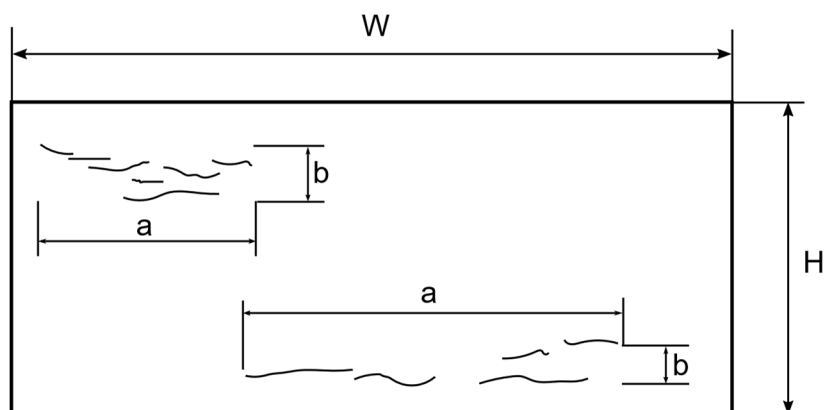
$$CLR = \frac{\sum a}{W} \cdot 100 \quad (23)$$

- 3) Poměr tloušťky trhlin (CTR)

$$CTR = \frac{\sum b}{H} \cdot 100 \quad (24)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam:

| | |
|-----|-------------------------------|
| a | délka trhliny [mm] |
| b | tloušťka trhliny [mm] |
| W | šířka úseku [mm] |
| H | tloušťka zkušební vzorku [mm] |

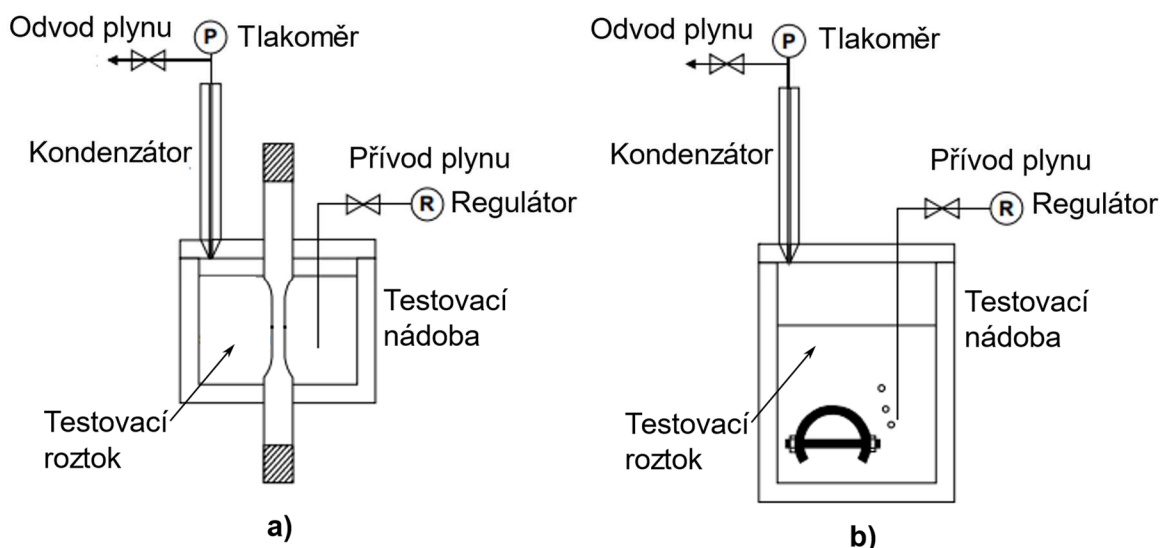


Obr.4.4 – Zkušební vzorek a rozměry trhlin [44]

Podobně jako norma NACE TM0284 [44] je zaměřena na testování odolnosti materiálu vůči poškození HIC, NACE TM0177 [45] se věnuje problematice SSC, SCC a HSC. Tyto degradační mechanismy spadají do skupiny environmentálního praskání, označovaného zkratkou EC. Norma zavádí čtyři standardní testovací metody, jsou to [45]:

- A - metoda tahové zkoušky
- B - metoda ohýbaní nosníku
- C - metoda C-kroužku
- D - metoda dvojitého konzolového nosníku

Každá metoda je vhodná pro jiné účely a materiály. Ve všeobecnosti všechny zkoušky probíhají následovně, testovací vzorky se umístí do okyseleného prostředí s obsahem H_2S a je na ně aplikováno zatížení. Používají se tři základní roztoky, které mají podobné chemické složení jako u zkoušky k náchylnosti na HIC, v kombinaci se směsí inertního plynu ve formě čistého dusíku, argonu či jiného vhodného nereaktivního plynu. Inertní plyn se používá pro odstranění nežádoucího kyslíku a mísí se s CO_2 a H_2S . Všechny zkušební zařízení se skládají ze zkušební nádoby a příslušenství, které musí odolávat korozním účinkům a tlaku vyžadovaném při průběhu testu (Obr. 4.5) [45].



Obr.4.5 – Schematické uspořádání zkušebního zařízení [45]
a) pro metodu A; b) pro metodu B, C a D

Tahová zkouška určuje odolnost vůči vzniku EC při jednoosém zatížení. Citlivost vůči EC u metody A definuje doba do selhání. Pro tuto metodu existuje vícero možných použitelných testovacích zařízení. Některé využívají principu konstantního zatížení využitím vlastní váhy, jiné demonstrují trvalé zatížení pomocí pružin nebo kontrolních kroužků. Zkouška se ukončí po 720 hodinách nebo při selhání vzorku, podle toho, která situace nastane dříve [45].

Metoda B spočívá v sérii vychylování zkušebních vzorků za použití různých úrovní koncentrovaného napětí a jejich následnému vystavení testovacímu prostředí. U každého vzorku se vyhodnotí, jestli došlo k jeho selhání. Z takto získaných údajů se pro 50% pravděpodobnost selhání statisticky spočte kritický napěťový faktor, který je zároveň indikátorem odolnosti materiálu vůči SSC [45].

Hodnocení odolnosti vůči EC vzorků, na které působí obvodové zatížení poskytuje metoda C. Je vhodná hlavně pro demonstraci poškození pro geometrii tyčí a potrubí. Citlivost vůči EC je obvykle určena, stejně jako u metody A, dobou do selhání [45].

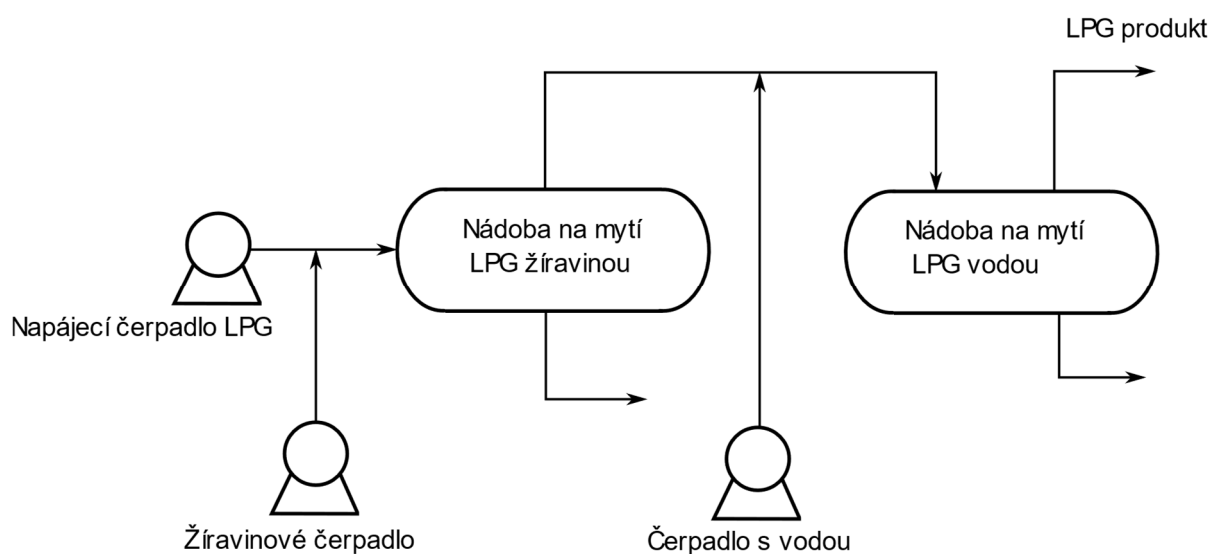
Metoda D stanovuje odolnost vůči SSC pomocí prahového součinitele intenzity napětí pro sulfanem indukované praskání za napětí, a pro obecnější případy pomocí prahového součinitele intenzity napětí za environmentální praskání. Poskytuje přímé číselné hodnocení odolnosti vůči praskání a jako jediná nezávisí na vyhodnocení výsledků ze selhání [45].

Sklon k poškození vodíkem řeší norma NACE MR0175 [46]. Ta se skládá ze tří částí, které odpovídají výše uvedené normě ČSN EN ISO 15156-1 [39] až 3. První publikace obou norem, obsahujících všechny tři části, byly poprvé dokončeny v roce 2003 a jsou prakticky identické [39]. Jsou doplněny výše vzpomenutými testovacími metodami NACE TM0284 [44] a NACE TM0177 [45].

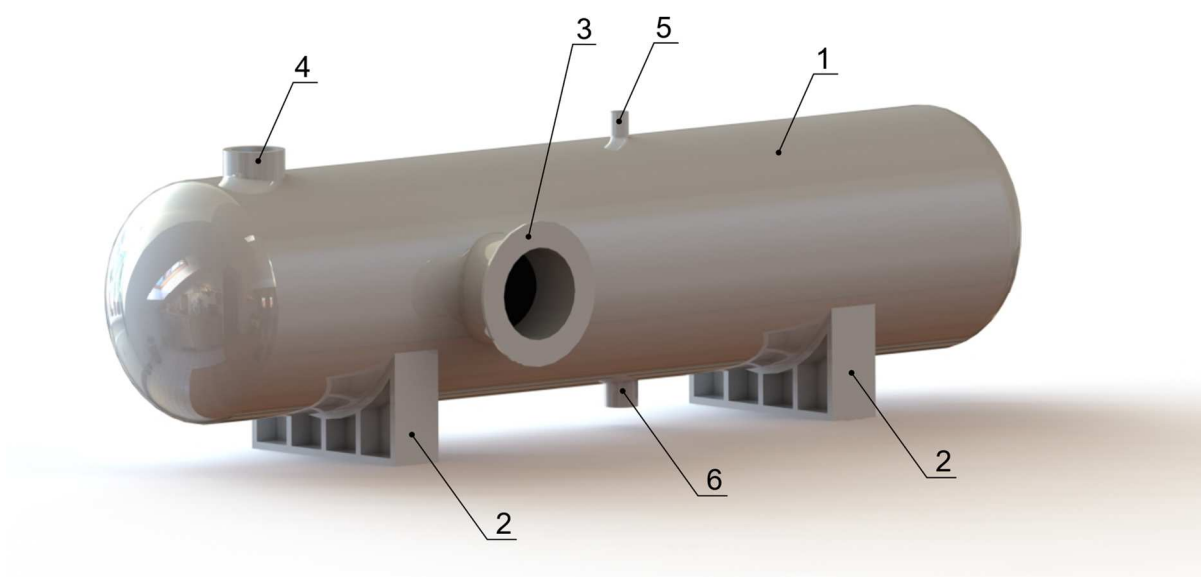
4.2. ÚVOD DO HODNOCENÍ VYBRANÉHO ZAŘÍZENÍ

Poškození zařízení ve spojitosti s přítomností vodíku, je v rafinérském průmyslu časté a představuje znepokojující problém. Proto byl z databáze science direct vybrán konkrétní případ takového poškození, popsáný ve vědecké publikaci [32]. Následně na něm bylo provedeno posouzení vodíkového zkřehnutí pomocí normy API 579-1 [20], což bylo jedním z cílů práce. Publikace popisuje případ poškození jedné z nádob, která je součástí systému v procesu fluidního katalytického krakování, rafinérské společnosti Indian Oil Corporation. Konkrétně se jedná o proces INDMAX, při kterém se z těžkých ropných frakcí získávají výtěžky jako propylen, butylen nebo vysokooktanový benzín. Při jejich zpracování však zároveň vzniká nežádoucí sirovodík, který musí být dodatečně odstraněn mytím v žíravině. Proces očištění probíhá následovně (obr.4.6). Žíravina a zkapalněný ropný plyn jsou smíchány pomocí mixéru a vstupují do první nádoby. Proběhne žíravinové mytí. Poté se produkt smíchá s užitkovou vodou. Směs putuje do druhé nádoby, kde se od žíraviny čistí vodou. Výparník v horní části nádoby odchází hotový LPG produkt, spodní výpustí je odčerpávaná voda (obr. 4.7) [32]. Proběhne-li však neúplná reakce sirovodíku se žíravinou, pak kromě vody a LPG vstupuje do druhé nádoby také určité množství sirovodíku. V důsledku čeho se začne zvyšovat kyselost vody na mytí. Kyselé prostředí podporuje vznik koroze a zbytkový vodík má tendenci být absorbován do kovu. V tomto

případě to mělo za následek silné poškození nádoby na mytí LPG pomocí vody, které se projevilo přítomností vodíkových puchýřů. Když bylo poškození nalezeno, nádoba byla v provozu dva roky. Byla doporučena k výměně. Avšak dodací doba na pořízení nové nádoby byla příliš dlouhá. Aby tedy nedošlo k jejímu naprostému vyřazení z provozu, bylo nutné vykonat hodnocení poškození, posouzení reálného stavu nádoby a zhodnotit možnost ponechat nádobu na daný čas v provozu. Dále byla provedena vizuální kontrola, chemická analýza, průzkum mikrotvrdosti a také ultrazvukové skenování [32]. Výstupem jsou informace, které dále poslouží ve výpočtu při posuzování stavu nádoby [47]. Po dohodě s vedoucím práce byly data upraveny a doplněny do podoby která je uvedena v tabulce 4.1.



4.3. SOUHRN ÚDAJŮ



Obr. 4.7 – Nádoba na mytí LPG od žíraviny
1 – tělo nádoby, 2 – sedlová podpora, 3 – servisní otvor, 4 – tryska, 5 – odvod produktu, 6 – odvod vody

Tabulka 4.1 – Vstupní parametry pro hodnocení vodíkových puchýřů

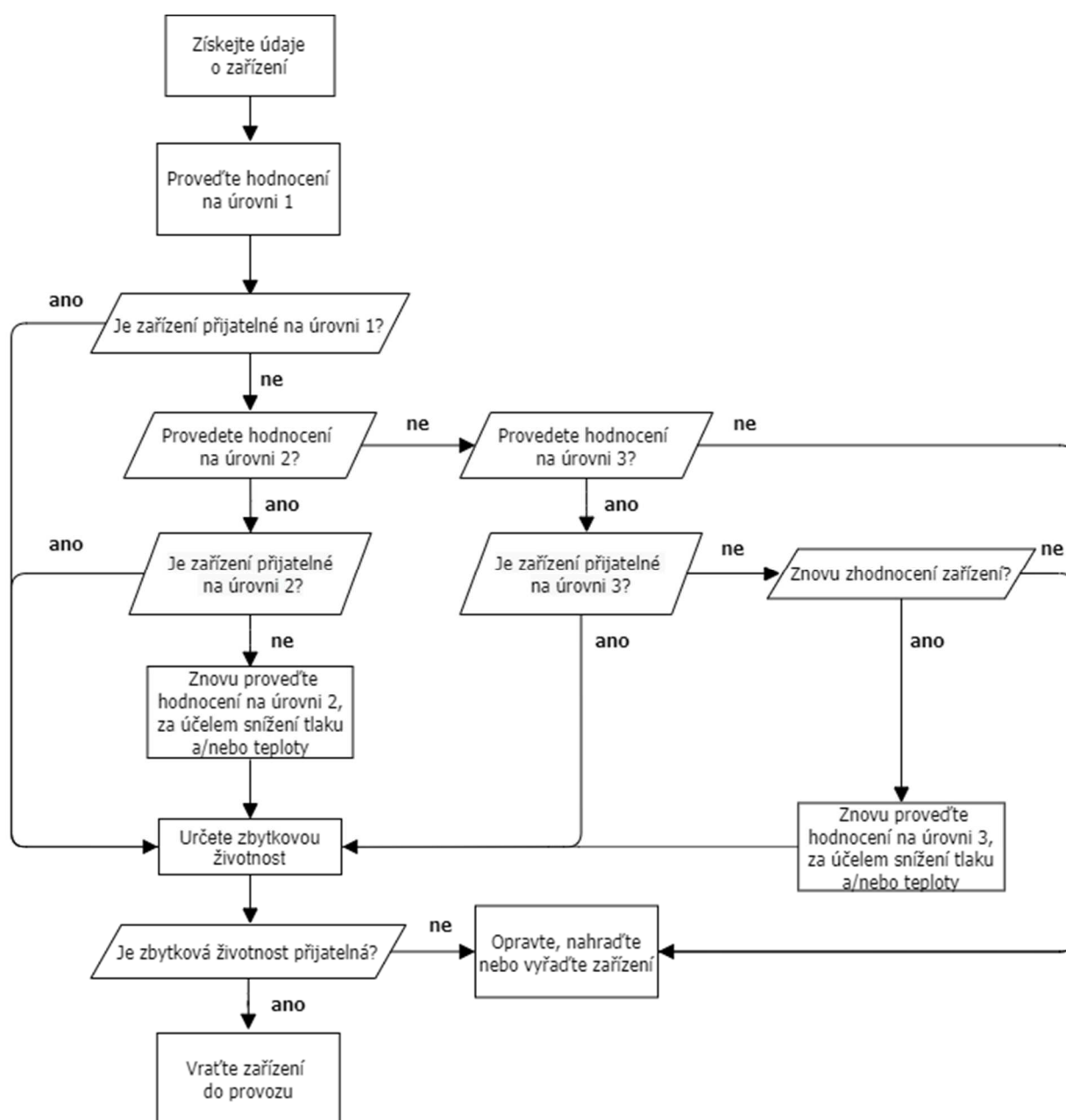
| Údaje požadované pro hodnocení na úrovni 1 a 2 | | | | | | | |
|---|------|---------|--------|---------|---------|---------|-------------|
| Označení puchýře | [-] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Rozměr puchýře v podélném směru s | [mm] | 120 | 90 | 110 | 120 | 130 | 100 |
| Rozměr puchýře ve směru obvodu c | [mm] | 56 | 46 | 49 | 72 | 78 | 82 |
| Vzdálenost od okraje k nejbližšímu puchýři L_B | [mm] | 197,87 | 197,87 | 95,01 | 213,08 | 95,01 | 938,9 |
| Směr vyboulení (dovnitř/ven) | [-] | ven | ven | ven | ven | ven | ven |
| Projekce puchýře B_p | [mm] | 2 | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 |
| Minimální naměřená tloušťka t_{mm} | [mm] | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Trhliny na okraji (ano/ne) | [-] | ano | ne | ne | ano | ano | ne |
| Trhliny na vrcholku nebo odvodušnění (ano/ne) | [-] | trhlina | ne | trhlina | trhlina | trhlina | ne |
| Délka trhliny na vrcholku nebo průměr odvodušňovacího otvoru s_c | [mm] | 9 | - | 9 | 9 | 9 | - |
| Vzdálenost od nejbližšího svaru L_w | [mm] | 278,5 | 583,6 | 702,85 | 378,44 | 877,1 | 579,5 |
| Vzdálenost k nejbližší strukturální diskontinuitě L_{msd} | [mm] | 748,57 | 823,37 | 678,79 | 786,14 | 484,54 | 1173,7 7 |

4.4. VYHODNOCENÍ VYBRANÉHO ZAŘÍZENÍ

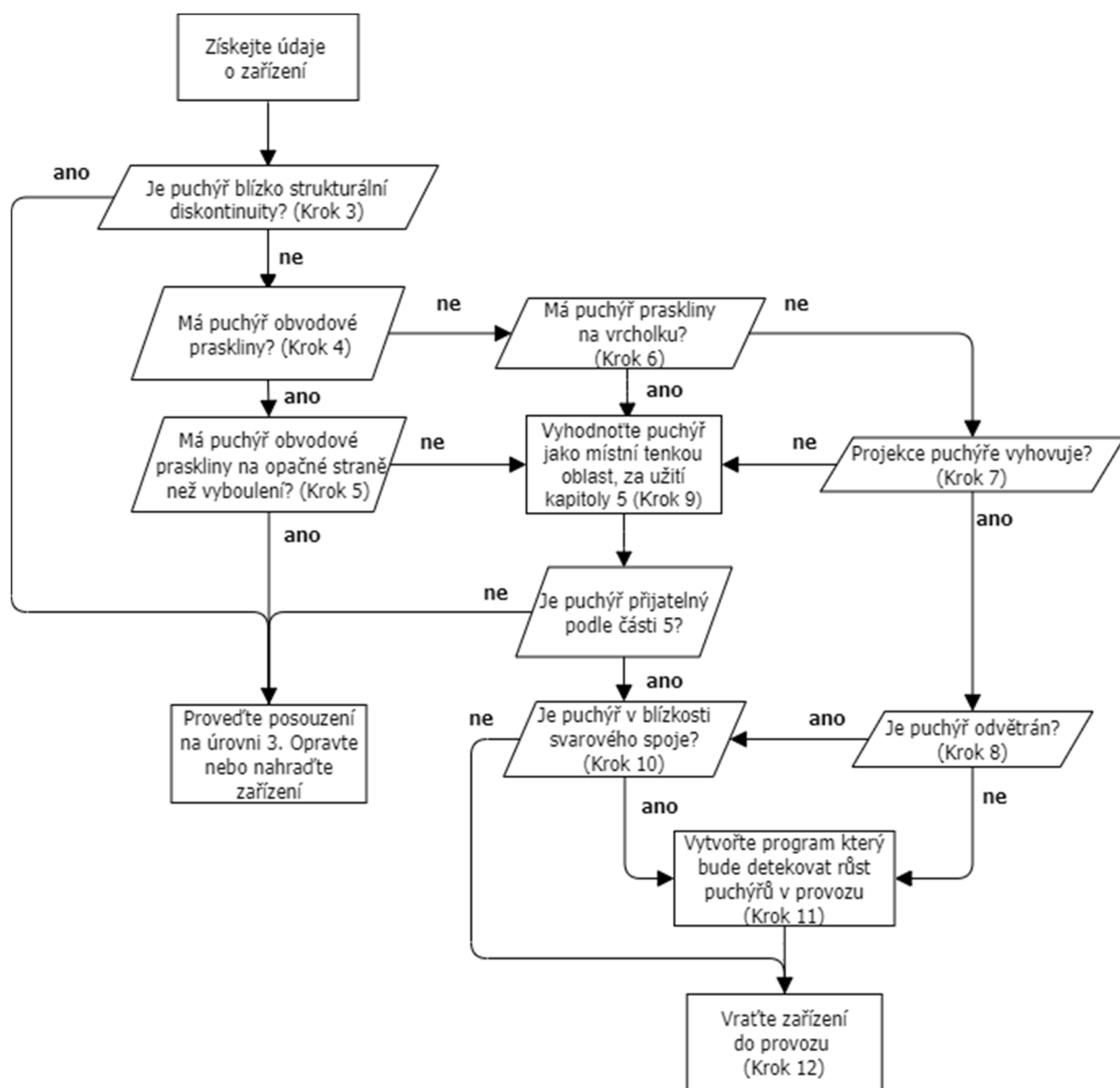
Hodnocení poškození vodíkových puchýřů 1 až 6, viz tabulka 4.1, a kompletní výpočet se nachází v příloze č.1. Výpočet se odkazuje na paragrafy normy API 579-1 [20].

Hodnocení vodíkových puchýřů na úrovni 1 proběhlo dle paragrafu 7.4.2.3. První úroveň nebyla splněna ani pro jeden puchýř. Všechny puchýře byly pro tuto úroveň příliš hluboké (viz příloha č.1, úroveň 1, krok 3.2). V polovině případů by puchýře hodnocením na úrovni 1 neprošly, už jen z toho důvodu, že se na jejich okrajích nacházejí praskliny (viz příloha č.1, úroveň 1, krok 3.4). Jedná se o puchýře s indexem 1, 4 a 5. Ve zbylých případech sehrála roli zejména velikost puchýřů (viz příloha č.1, úroveň 1, krok 3.1). Jak je zřejmé z logického diagramu (obr. 4.8), po selhání hodnocení na úrovni 1, je nutné provést hodnocení na úrovni 2, popřípadě 3. To proběhlo podle paragrafu 7.4.3.3, při kterém byly využity některé kroky z předchozí

úrovně. Pro tento postup platí diagram uvedený níže (obr. 4.9), který usnadňuje orientaci ve výpočtu. Jelikož byly všechny puchýře dostatečně vzdáleny od jakékoliv strukturální diskontinuity (viz příloha č.1, úroveň 2, krok 3), jako servisní otvor, tryska či odvod, při postupu hodnocení se lišily opět přítomností okrajových trhlin (viz příloha č.1, úroveň 2 krok 4). U puchýřů s těmito prasklinami bylo nutné určit maximální dovolený pracovní tlak. Byla stanovena jeho hodnota 3,61 MPa. Naopak kvůli puchýřům bez těchto trhlin, norma doporučuje nasazení monitorovacího systému, za účelem sledování růstu puchýřů v provozu. Nádoba tak může být vrácena do provozu. Dále norma nabádá k určení zbytkové životnosti (obr. 4.8). Tu a rychlost růstu puchýřů však, dle paragrafu 7.5.2, nelze analyticky určit. To ale není nutné, protože přítomnost puchýřů nemá přímý vliv na intervaly pravidelných kontrol, které je nutno vykonávat.



Obr.4.8 – Logický diagram pro hodnocení vodíkových puchýřů [20]



Obr.4.9 – Logický diagram pro hodnocení vodíkových puchýřů na úrovni 2 [20]

ZÁVĚR

Procesní zařízení často pracují v prostředích, které doprovází vznik a přítomnost degradačních mechanismů. Na první pohled vždy nemusí být jasná míra závažnosti takového poškození. V reakci na tyto a další skutečnosti, byly v této bakalářské práci prozkoumány dva degradační mechanismy typicky vyskytující se u procesních zařízení. První část práce byla věnována problematice creepu, jeho vzniku, chování a vlivu na vlastnosti materiálu. U creepu se poté pozornost obrací na oblast svarových spojů, které se při zvýšených teplotách chovají odlišně než základní materiál. Dále byl proveden přehledový popis norem určených pro návrh, hodnocení a laboratorní zkoušky zařízení, pracujících při teplotách v rozmezí creepové oblasti. Na zvolené geometrii byla vyzkoušena použitelnost normy API 579-1 [20] pro poškození creepového praskání ve svarových spojkách. Zbývajících část práce obsahuje řešerši týkající se vodíkového poškození a jeho častých forem. Pojednává zejména o vzniku, vývoji a možnostech hodnocení vodíkového zkřehnutí a vodíkových puchýřů. Na poškození těmito vodíkovými puchýři a konkrétním zařízením je postaven ukázkový příklad, jehož výpočet demonstruje průběh hodnocení.

Hodnocení zařízení poškozených určitou formou tečení se věnuje řada evropských i světových norem. Použití normy API 579-1 [20] při vyhodnocování zařízení poškozeného creepem v širším smyslu se jeví být velmi efektivní. Norma je přehledná a propracovaná do detailů. Co se týče problematiky svarových spojů vystavených creepovému rozmezí jsou její možnosti omezené. Na tuto problematiku je zaměřena norma BS 7910 [24]. Provedení hodnocení podle obou norem na zvolené geometrii a jejich následné porovnání by mohlo být předmětem navazující práce. Hodnocení tohoto degradačního mechanismu je však závislé na datech týkajících se historie zatěžování. V případě absence těchto záznamů neexistuje postup, který by poskytl reálné a užitečné výsledky.

V porovnání s možnostmi hodnocení creepu, existuje pro hodnocení poškození vodíkem rozhodně méně norem. To může být způsobeno skutečností, že poškození vodíkem se objevuje, u převážné většiny případů, v kyselém prostředí typickém pro naftařský průmysl. Zatím co creep postihuje zařízení pracující při zvýšených teplotách, které se vyskytují v mnoho odvětvích. Na druhou stranu mnoho norem věnuje pozornost předcházení vzniku tohoto poškození. Jedná se o postupy laboratorních zkoušek zaměřených na testování náchylnosti k danému vodíkovému poškození nebo o normy posuzující vhodnost použití materiálu, který bude vystaven tomuto prostředí. Ty mohou jednoznačně pomoci při návrhu a výrobě zařízení určeného k provozu, kde by mohlo dojít k absorpci vodíku do kovu a následně způsobit škody. U tohoto hodnocení není historie zatěžování natolik klíčová, jako je tomu u creepu. Samozřejmě je nutné znát základní parametry, ale většina údajů je získávána určitou formou měření poškození.

Cílem praktické části bylo provést hodnocení zařízení poškozeného vodíkovými puchýři. Na toto zařízení byly aplikovány postupy normy API 579-1 [20]. Výpočet hodnotil míru poškození celkem šesti puchýřů s různými rozměry a vlastnostmi. První úroveň splněna nebyla, a to zejména kvůli velikosti puchýřů. Poškození tedy prošlo až druhou úrovní, což by se dalo nazvat jako střední rozsah poškození. Dle pokynů normy však mohlo být zařízení vráceno do provozu. Při hodnocení puchýřů jsou

rozhodující jejich vzdálenosti od svarových spojů, strukturální diskontinuity a přítomnost obvodových trhlin. Tento výpočet byl vytvořen v prostředí programu Mathcad [48] a všechny rovnice, tudíž musely být vytvořeny ručně. Tento způsob je samozřejmě poněkud časově náročný a zvyšuje pravděpodobnost vzniku chyb. Existuje i rychlejší a efektivnější řešení jako je použití programu INSPECT [22]. Ten je s normou API 579-1 [20] kompatibilní, ale plně ji doposud nahradit nedokáže. Jeho využití by se dalo vyčlenit pouze na výpočet. Samotné posouzení výsledků za pomoci normy v klasické formě, už náleží příslušnému technikovi.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LASEK, Stanislav. *ZÁKLADY DEGRADAČNÍCH PROCESŮ* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2020-10-24]. ISBN 978-80-248-3373-6. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/zaklady-degradacnich-procesu/Lasek_Zaklady_degradacnich_procesu.pdf
- [2] CREEP. *ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽINÝRSTVÍ* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/mezni_stavy/prednasky/6MS_10_creep.pdf
- [3] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-417-1.
- [4] VEJVODA, Stanislav. *Stavba procesních zařízení: hodnocení odolnosti materiálů tlakových nádob proti jejich poškození v provozních podmínkách*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-214-2302-1.
- [5] CREEP AND CREEP TESTING. *TWI-Global.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/creep-and-creep-testing-081>
- [6] VLACH, Bohumil. *Creep a LOM PŘI CREEPU* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/mezni_stavy/podklady/09%20-%20Creep.pdf
- [7] NANDI, Somnath G. Jaipal REDDY a Kulvir SINGH. Microstructural Changes in IN617 Superalloy during Creep at High Temperatures. *Procedia Engineering* [online]. 2014, č. 86 [cit. 2020-11-22]. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.012. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814019717>
- [8] ZHANG, Yang, Debapriya Pinaki MOHANTY, Philipp SEILER, Thomas SIEGMUND, Jamie J. KRIZIC a Vikas TOMAR. High temperature indentation based property measurements of IN-617. *International Journal of Plasticity* [online]. 2017, č. 96 [cit. 2020-11-22]. DOI: 10.1016/j.ijplas.2017.05.007. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749641917301365#!>

- [9] WANG, Yue, Li SHI, Chaoyu HAN, Kejian LI, Zhipeng CAI a Haitao WANG. Creep rupture mechanisms and life prediction of IN617 for VHTR applications. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2021, č. 812 [cit. 2021-05-04]. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141151. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509321004202>
- [10] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. vyd. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-7204-130-č.
- [11] LAHA, K., K.S. CHANDRAVATHI, P. PARAMESWARAN, K. BHANU SANKARA RAO and S.L. MANNAN. *Type IV Cracking in Modified 9Cr-1Mo Steel Weld Joint* [online]. Metallurgy and Materials Group, 2007 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <http://www.igcar.gov.in/pttc/mmg/11-sci.pdf>
- [12] TABUCHI, Masaaki, Takashi WATANABE, Kiyoshi KUBO, Masakazu MATSUI, Junichi KINUGAWA, Fujio ABE. Creep crack growth behavior in the HAZ of weldments of W containing high Cr steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2001, č. 78 [cit. 2020-11-16]. DOI:10.1016/S0308-0161(01)00090-4. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/223653444_Creep_crack_growth_behavior_in_the_HAZ_of_weldments_of_W_containing_high_Cr_steel
- [13] Microstructural characterization of the welded joint. In: *Researchgate.net* [online]. 2015 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Microstructural-characterization-of-the-welded-joint-a-Base-metal-BM-b-Weld-metal_fig3_277917470
- [14] Location of creep failure in the 9Cr-1MoVNb steel weld joint. In: *Link.springer.com* [online]. 2009 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-008-9724-x>
- [15] ČSN EN 13445-3. *Netopené tlakové nádoby – Část 3: Konstrukce a výpočet* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 695245.
- [16] ČSN EN 12952-4. *Vodotrubné kotle a pomocná zařízení – Část 4: Provozní výpočty očekávané doby života kotle* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 077604.
- [17] ČSN EN ISO 204. *Kovové materiály – Zkoušení tečení jednoosým tahem – Zkušební metoda* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019 [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 420351.
- [18] ČSN EN 993-9. *Zkušební metody pro žárovzporné výrobky tvarové hutné – Část 9: Stanovení tečení v tlaku* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998 [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 726020.

- [19] American Boiler Manufacturers Association. *COMPARISON OF FATIGUE ASSESSMENT TECHNIQUES FOR HEAT RECOVERY STEAM GENERATORS* [online]. 2003 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: https://www.abma.com/assets/docs/Tech_Resources/2015%20-%20abma_hrsq_fatigue_assessment_2003.pdf
- [20] API 579-1/ASME FFS-1. *Fitness for service*. Washington: American Petroleum Institute, 2016.
- [21] PRAGER, M. Development of the MPC Project Omega Method for Life Assessment in the Creep Range. *Journal of Pressure Vessel Technology* [online]. 1995 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1089.5763&rep=rep1&type=pdf>
- [22] CODEWARE. *INSPECT* [software]. Dostupné z: <https://www.codeware.com/products/inspect/>
- [23] Codeware. API 579 Part 10 Creep Damage Assessments with INSPECT. In: *Youtube* [online]. 4. 12. 2019 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=UHZiEdBfqPk&ab_channel=Codeware
- [24] BS 7910. *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. London: British Standards Institution, 2005. ISBN 0-580-45965-9.
- [25] SONG, Ming, Tong XU, Keyi YUAN, Haiyang YU a Chao SUN. Creep failure of a steam pipe girth weld and NDT strategy on creep damage. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2019, č.104 [cit. 2020-11-23]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.048. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630718313888?via%3Dihub>
- [26] Hydrogen Attack, Detection, Assessment and Evaluation. *ndt.net* [online]. Adelaide: Australian Institute for Non Destructive Testing, © 2001 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.ndt.net/apcndt2001/papers/1154/1154.htm>
- [27] XING Xiao, Hao ZHANG, Gan CUI, Jianguo LIU a Zili LI. Hydrogen inhibited phase transition near crack tip – An atomistic mechanism of hydrogen embrittlement. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2019, č.44 [cit. 2020-10-23]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.205. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0360319919316386>
- [28] LANNUZZI, Mariano, Afrooz BARNOUSH a Roy JOHNSSEN. Hydrogen embrittlement of UNS N07725 showing signs of intergranular cleavage. In: *researchgate.net* [online]. 2017. Nature partner journals Materials Degradation. DOI: 10.1038/s41529-017-0003-4. [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Hydrogen-embrittlement-of-UNS-N07725-showing-signs-of-intergranular-cleavage-Image_fig3_316622305

- [29] EUN, T. Jung-Chul. *Handbook of Engineering Practice of Materials and Corrosion* [online]. 1. vyd. Cham: Springer International Publishing, 2020 [cit. 2020-11-23]. ISBN 978-3-030-36430-4. Dostupné z: <https://books.google.sk/books?id=hnD7DwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=slovak#v=onepage&q&f=false>
- [30] WHAT IS HYDROGEN EMBRITTLEMENT? - CAUSES, EFFECTS AND PREVENTION. *TWI-Global.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-hydrogen-embrittlement>
- [31] CONDON, J.B a T. SCHOBBER. Hydrogen bubbles in metals. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 1993, č. 207 [cit. 2021-03-23]. DOI: 10.1016/0022-3115(93)90244-S. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002231159390244S>
- [32] BHATTACHARYA Sova, Kannan CHANDRASEKARAN a A.K. LAHIRI. Comprehensive reliability analysis of blistered 'LPG' wash water vessel in FCC unit – Part I Engineering Critical Assessment of blistered vessel. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2013, č. 32 [cit. 2021-02-12]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.02.027. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630713000952>
- [33] Codeware. API 579 Part 7 HIC and Blister Damage in INSPECT. In: *Youtube* [online]. 22. 9. 2020 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=0VD0uV0iHvE&ab_channel=Codeware
- [34] Overview of API RP 941 - Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures. *Inspectioneering.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://inspectioneering.com/tag/api+rp+941>
- [35] ČSN EN ISO 4628-2. *Nátěrové hmoty – Hodnocení degradace nátěrů – Klasifikace množství a velikosti defektů a intenzity jednotných změn vzhledu – Část 2: Hodnocení stupně puchýřkování* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 20 stran [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 673071.
- [36] ČSN EN ISO 8044. *Koroze kovů a slitin – Slovník* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 038001.
- [37] ČSN EN 2832. *Letectví a kosmonautika. Vodíková křehkost ocelí. Zkouška tahem na zkušebním tělese s vrubem* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1996 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 312011.
- [38] ČSN EN 2831. *Letectví a kosmonautika. Vodíková křehkost ocelí. Zkouška pomalým ohybem* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1996 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 312010.

- [39] ČSN EN ISO 15156-1. *Naftový a plynárenský průmysl – Materiály pro využití v prostředí obsahujícím H₂S z těžby ropy a zemního plynu – Část 1: Obecné zásady pro výběr materiálů odolných proti tvorbě trhlin* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 450032.
- [40] ČSN EN ISO 15156-2. *Naftový a plynárenský průmysl – Materiály pro využití v prostředí obsahujícím H₂S z těžby ropy a zemního plynu – Část 2: Litiny, uhlíkové a nízkolegované oceli odolné proti tvorbě trhlin* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 450032.
- [41] ČSN EN ISO 15156-3. *Naftový a plynárenský průmysl – Materiály pro využití v prostředí obsahujícím H₂S z těžby ropy a zemního plynu – Korozivzdorné (CRA) a ostatní slitiny odolné proti tvorbě trhlin* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 450032.
- [42] Detection, Repair, and Mitigation of Cracking in Refinery Equipment in Wet H₂S Environments. In: *webstore.ansi.org* [online]. 2016 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: https://webstore.ansi.org/preview-pages/NACE/preview_NACE+SP0296-2016.pdf
- [43] NACE SP0472. *Standard Practice: Methods and Controls to Prevent In-Service Environmental Cracking of Carbon Steel Weldments in Corrosive Petroleum Refining Environments* [online]. Houston: NACE International, 2010 [cit. 2021-04-16]. ISBN 1-57590-114-5. Dostupné z: <https://fddocuments.in/document/nace-sp0472.html>
- [44] ANSI/NACE TM0284. *Standard Test Method: Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking* [online]. Houston: NACE International, 2003 [cit. 2021-04-16]. ISBN 1-57590-163-3. Dostupné z: <https://icdn.tradew.com/file/201801/1572618/pdf/6800351.pdf>
- [45] NACE TM0177. *Standard Test Method: Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments* [online]. Houston: NACE International, 2005 [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://img64.chem17.com/1/20140414/635330784022177696622.pdf>
- [46] NACE MR0175/ISO 15156-1. *Petroleum and natural gas industries— Materials for use in H₂S-containing Environments in oil and gas production: Part 1, part 2, part 3* [online]. Houston: NACE International, 2003 [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://www.octalsteel.com/wp-content/uploads/2017/10/NACE-MR0175-ISO15156-specification.pdf>

- [47] BHATTACHARYA Sova, Kannan CHANDRASEKARAN a A.K. LAHIRI. Comprehensive reliability analysis of blistered 'LPG' wash water vessel in FCC unit – Part II Engineering Critical Assessment of blistered vessel. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2013, č. 32 [cit. 2021-02-12]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.04.009. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630713001428>
- [48] PTC. *Mathcad Prime 3.1* [software]. [přístup 18.10.2020].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN

| Symbol | Význam | Jednotka |
|---------------------|--|--|
| A | Konstanta závislá na materiálu | $\text{mm}^{-0,5}$ |
| a | Délka trhliny | mm |
| B | Experimentálně určená konstanta | - |
| B_p | Projekce puchýře | mm |
| b | Tloušťka trhliny | mm |
| b^* | Experimentálně určený exponent | - |
| C | Konstanta | $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| C_{LMP} | Larson-Millerova konstanta | - |
| CLR | Poměr délky trhlin | % |
| CSR | Poměr citlivosti trhlin | % |
| CTR | Poměr tloušťky trhlin | % |
| c | Rozměr puchýře ve směru obvodu | mm |
| c_{krit} | Kritický obsah vodíku v procesní zóně | - |
| c_o | Obsah difusního vodíku v mřížce | - |
| D | Lineární průměr primárního austenitického zrna | m |
| D_c | Poškození materiálu tečením | - |
| $D_{ci k}$ | Podíl poškození materiálu tečením | - |
| D_o | Difúzní koeficient vodíku | $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ |
| D_c^{allow} | Dovolené creepové poškození | - |
| D_c^{total} | Celkové creepové poškození s ohledem na všechny provozní cykly | - |
| ${}^m D_c$ | Creepové poškození pro m-tou časovou periodu | - |
| E_T | Modul pružnosti při teplotě T_S | MPa |
| H | Tloušťka zkušební vzorku | mm |
| K_I | Okamžitá hodnota součinitele intenzity napětí | $\text{Mpa} \cdot \text{m}^{0,5}$ |
| K_{ISH} | Prahová hodnota součinitele intenzity napětí | $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$ |
| k_1 | Přizpůsobovací konstanta | - |
| L_B | Vzdálenost od okraje k nejbližšímu puchýři | mm |
| L_{msd} | Vzdálenost k nejbližší strukturální diskontinuitě | mm |
| L_w | Vzdálenost od nejbližšího svaru | mm |
| ${}^n L$ | Čas do selhání pro n-tý časový přírůstek | h |
| $LMP({}^n S_{eff})$ | Larson-Millerův parametr jako funkce napětí σ_{eff} | - |
| Q | Aktivační energie pro difúzi vodíku v α -mřížce | $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| Q_c^* | Zdánlivá aktivační energie creepu | $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| R | Univerzální plynová konstanta | $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| $R_{p0,2}$ | Smluvní mez kluzu při 0,2 % celkové deformace | MPa |
| ${}^n S_{eff}$ | Efektivní napětí | ksi |
| s | Rozměr puchýře v podélném směru | mm |

| | | |
|--------------------------|--|------------------------------------|
| s_c | Délka trhliny na vrcholku nebo průměr odvzdušňovacího otvoru | mm |
| T | Absolutní teplota | K |
| T_{al} | Teoretická doba života | h |
| T_{op} | Doba provozu při provozních podmínkách | h |
| T_S | Teplota materiálu, po jejíž překročení nastává tečení | K |
| T_t | Teplota tavení | K |
| nT | Teplota pro n-tý časový přírůstek | °F |
| t | Čas | s |
| t_f | Čas do lomu | s |
| t_{mm} | Minimální naměřená tloušťka | mm |
| t_p | Doba do porušení | s |
| ${}^n t$ | Přírůstek času nebo doba trvání zatížení pro použití při výpočtu poškození | h |
| u | Přizpůsobovací konstanta | - |
| V^* | Parciální molekulární objem vodíku v procesní zóně | $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| W | Šířka úseku | mm |
| α | Materiálový parametr, závislý na teplotě a napětí | - |
| α_0 | Úhel ohybu před úpravou povrchu | ° |
| α_{11} | Úhel ohybu po úpravě povrchu | ° |
| α_{12} | Úhel ohybu po odstranění vodíku | ° |
| γ | Materiálový parametr, závislý na teplotě a napětí | - |
| ε | Deformace | - |
| ε_0 | Počáteční deformace | - |
| $\dot{\varepsilon}$ | Rychlost tečení materiálu | s^{-1} |
| $\dot{\varepsilon}_{co}$ | Počáteční rychlost creepové deformace | - |
| μ | Poissonovo číslo | - |
| σ | Napětí | MPa |
| σ_{TS} | Mez pevnosti v tahu | MPa |
| Ω_m | Multiaxiální parametr poškození | h^{-1} |

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| Zkratka | Význam |
|------------------|---|
| CLR | Poměr délky trhlin |
| CSR | Poměr citlivosti trhlin |
| CTR | Poměr tloušťky trhlin |
| EC | Enviromentální praskání |
| HIC | Trhliny indukované vodíkem |
| HSC | Vodíkové praskání za napětí |
| HTHA | Napadání vodíkem při vysoké teplotě |
| LPG | Zkapalněný ropný plyn |
| SCC | Korozní praskání za napětí |
| SOHIC | Napětově orientované trhliny indukované vodíkem |
| SSC | Sulfanem indukované praskání za napětí |
| CO ₂ | Oxid uhličitý |
| H ₂ | Vodík |
| H ₂ S | Sulfan (sirovodík) |
| NaOH | Hydroxid sodný |

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

| | | |
|-------------|--|----|
| Obrázek 1.1 | Oblasti tečení [3] | 11 |
| Obrázek 1.2 | Schéma reprezentující creepové chování [1] | 12 |
| Obrázek 1.3 | Graf demonstrující funkci Wilshireovy rovnice [9] | 14 |
| Obrázek 1.4 | Mikrostruktura svarového spoje [13] | 15 |
| Obrázek 1.5 | Selhání creepem ve svarovém spoji [14] | 15 |
| Obrázek 2.1 | Digram pro stanovení Tal [16] | 17 |
| Obrázek 2.2 | Stanovení teploty T_c [22] | 20 |
| Obrázek 2.3 | Stanovení času $t(T)$ pro dosažení 0,2 % přetvoření [22] | 21 |
| Obrázek 2.4 | Výřez poškozené části potrubí [23] | 22 |
| Obrázek 3.1 | Základní rozdělení vodíkového poškození [24] | 24 |
| Obrázek 3.2 | Příklad trhliny způsobené vodíkovým zkřehnutím [26] | 26 |
| Obrázek 3.3 | Růst trhliny s nadifundovaným vodíkem [4] | 27 |
| Obrázek 3.4 | Vodíkový puchýř v řezu [30] | 28 |
| Obrázek 3.5 | Stádia vzniku vodíkového puchýře [29] | 29 |
| Obrázek 4.1 | Kombinované poškození na modelu v prostředí programu INSPECT [31] | 31 |
| Obrázek 4.2 | Nátěr obsahující puchýřky o množství 2 a velikosti 5 [34] | 32 |
| Obrázek 4.3 | Schéma testovací sestavy [42] | 34 |
| Obrázek 4.4 | Zkušební vzorek a rozměry trhlín [42] | 35 |
| Obrázek 4.5 | Schematické uspořádání zkušebního zařízení [43] | 35 |
| Obrázek 4.6 | Jednoduché schéma čistícího systému [30] | 37 |
| Obrázek 4.7 | Nádoba na mytí LPG od žíraviny | 37 |
| Obrázek 4.8 | Logický diagram pro hodnocení vodíkových puchýřů [20] | 39 |
| Obrázek 4.9 | Logický diagram pro hodnocení vodíkových puchýřů na úrovni 2 [20] | 40 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tabulka 1.1 Mez kluzu a mez pevnosti v tahu materiálu IN617 [9] | 13 |
| Tabulka 4.1 Vstupní parametry pro hodnocení vodíkových puchýřů | 38 |

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1Hodnocení vodíkových puchýřů